Environnement Canada
Service de la protection de l'environnement

Environment Canada
Environmental Protection Service

Évaluation des dispositifs de commande de l'écoulement continu de l'eau

Canada

Technologie
Rapport SPE 4-WP-83-1F

Direction générale de la lutte contre la pollution des eaux
Mars 1983

85-2111

SÉRIE DE RAPPORTS DU SERVICE DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Les rapports sur le développement technologique décrivent l'outillage et les procédés techniques, ainsi que les résultats des études portant sur les laboratoires, les installations d'essai, les démonstrations, ou l'évaluation des équipements. Ces rapports constituent une source centrale de renseignements sur les activités et la mise en valeur du Service de la protection de l'environnement.

Les autres catégories de la série de rapports du S.P.E. comprennent les groupes suivants: règlements, codes et accords; politique et planification; analyse économique et technique; surveillance; guides de formation; rapports et exposés à l'enquête publique; et impacts environnementaux.

Les demandes relatives aux rapports du Service de la protection de l'environnement doivent être adressées au Service de la protection de l'environnement, ministère de l'Environnement, Hull (Québec), Canada K1A 1C8.

ENVIRONMENTAL PROTECTION SERVICE REPORT SERIES

Technology Development Reports describe technical apparatus and procedures, and results of laboratory, pilot plant, demonstration or equipment evaluation studies. They provide a central source of information on the development and demonstration activities of the Environmental Protection Service.

Other categories in the EPS series include such groups as Regulations, Codes, and Protocols; Policy and Planning; Economic and Technical Review; Surveillance; Training Manuals; Briefs and Submission to Public Inquiries; and, Environmental Impact and Assessment.

Inquiries pertaining to Environmental Protection Service Reports should be directed to the Environmental Protection Service, Department of the Environment, Hull, Quebec, Canada, K1A 1C8.

ÉVALUATION DES DISPOSITIFS DE COMMANDE DE L'ÉCOULEMENT CONTINU DE L'EAU

par

Daniel W. Smith et Allan Yee
Département de génie civil
Université de l'Alberta

pour le compte de la

Direction générale de la pollution des eaux
Service de protection de l'environnement
Environnement Canada

Rapport nº EPS 4-WP-83-1F
Mars 1983

Publication distribuée par
Environnement Canada
Ottawa
K1A 1C8

Édition française de
Evaluation of Water Bleeder Controls

préparée par le Module d'édition française
d'Environnement Canada

Nº de catalogue: En 43-4/83-1F
ISBN: 0-662-92386-3

©
Ministre des Approvisionnements et Services

AVIS D'EXAMEN

Le présent rapport a été examiné par la Direction générale de la pollution des eaux, du Service de protection de l'environnement, qui en a approuvé la publication. Cette approbation ne signifie pas nécessairement que le contenu du rapport reflète le point de vue et la politique du Service. La mention dans le rapport de marques de commerce et de produits commerciaux ne signifie pas davantage que leur utilisation est approuvée ou recommandée.

RÉSUMÉ

L'écoulement continu des branchements, des conduites en impasse et des prises d'eau est la façon la plus simple de protéger contre le gel les réseaux classiques d'adduction d'eau dans les régions septentrionales. Cette pratique augmente toutefois le volume d'eau consommée, le coût d'exploitation et le volume des eaux usées froides, diluées et difficiles à traiter.

L'étude décrite dans le présent rapport a été menée afin de mettre au point de nouveaux dispositifs de commande de l'écoulement continu des branchements à combiner au dispositif actuel d'écoulement continu. Cinq dispositifs ont été éprouvés en laboratoire: un dispositif de réglage de la température, une minuterie, un diaphragme, un réservoir et un réservoir sous pression. Le diaphragme et la minuterie réglable ont donné des résultats considérés comme techniquement acceptables et leur mise au point plus poussée est recommandée. La minuterie permettrait de meilleures économies d'eau et semble le plus économique des deux dispositifs retenus.

ABSTRACT

Bleeding of service lines, dead-end mains, and hydrants is the simplest method of protection against freezing for a conventionally-laid piped water system in northern areas. Bleeding of water systems, however, means high-volume water use, increased operating costs and large quantities of cold, dilute, difficult-to-treat wastewater.

This study was conducted to evaluate viable alternative service line bleeder controls for use with existing bleeder systems. Five bleeder control devices were tested in the laboratory: a temperature controller, a timer, an orifice plate, a gravity flow drainage tank and a storage pressure tank. The orifice plate and the variable set timer provided results considered technically acceptable and are recommended for further development. The timer provided the greatest potential for saving water, and appears to be the more economic of the two alternatives.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ/ABSTRACT		IV
LISTE DES FIGURES		VI
LISTE DES TABLEAUX		VII
1	INTRODUCTION	1
1.1	Historique de la mise au point de dispositifs de protection contre le gel	1
1.2	Données de base et objectifs de l'étude	9
2	DÉCOUVERTE ET ESSAI DE NOUVEAUX DISPOSITIFS DE COMMANDE ET DE L'ÉCOULEMENT CONTINU	13
2.1	Examen initial et choix des nouveaux dispositifs	13
2.2	Installations du laboratoire	15
3	ESSAIS EN LABORATOIRE: MÉTHODES ET RÉSULTATS	24
3.1	Essai n° 1	24
3.2	Essai n° 2	24
3.3	Essai n° 3	30
3.4	Essai n° 4	32
3.5	Essai n° 5	35
3.6	Essai n° 6	37
4	DISCUSSION	38
4.1	Dispositif de réglage de la température	38
4.2	Minuterie	38
4.3	Diaphragme	39
4.4	Réservoir	39
4.5	Réservoir sous pression	40
4.6	Coût des divers dispositifs d'écoulement continu dans les conduites de distribution	41
5	RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS	44
RÉFÉRENCES		46
ANNEXE - ÉQUATION DE L'ORIFICE		51

LISTE DES FIGURES

1	Modèle d'installation d'un branchement muni de "pitorifices"	3
2	Modèle de dispositif d'écoulement continu d'une maison de Whitehorse	11
3	Tuyauterie à l'intérieur de la chambre froide	16
4	Tuyauterie à l'extérieur de la chambre froide	17
5	Dispositif de réglage de la température et sonde thermométrique	17
6	Les deux minuteries utilisées lors des essais en laboratoire	18
7	Diaphragme et raccord union en cuivre jaune	19
8	Réservoir de vidange muni de détecteurs de niveau	20
9	Réservoir sous pression (installation sur le terrain)	21
10	Réservoir sous pression (installation en laboratoire)	21
11	Enregistreur automatique de données Fluke 2240B	22
12	Graphique de la température lors de l'essai nº 1	26
13	Taux de consommation d'eau au cours de l'essai nº 1	27
14	Bris typique d'un tuyau au niveau du coude	28
15	Graphique de la température lors de l'essai nº 2	28
16	Taux de consommation d'eau au cours de l'essai nº 2	29
17	Graphique de la température lors de l'essai nº 3	30
18	Taux de consommation d'eau au cours de l'essai nº 3	31
19	Installation du détendeur de pression et du diaphragme	32
20	Graphique de la température lors de l'essai nº 4	33
21	Taux de consommation d'eau au cours de l'essai nº 4	34
22	Installation du réservoir sous pression	35
23	Graphique de la température lors de l'essai nº 5	36
24	Graphique de la température lors de l'essai nº 6	37

LISTE DES TABLEAUX

1	Consommation d'eau dans certaines communautés nordiques où l'on applique la méthode de l'écoulement continu	7
2	Débit des dispositifs d'écoulement continu de Whitehorse	12
3	Solutions permettant l'élimination des dispositifs d'écoulement continu dans les conduits de distribution ou la réduction de leur débit	14
4	Données sur le gaspillage de l'eau obtenues lors de l'essai nº 1	27
5	Données sur le gaspillage de l'eau obtenues lors de l'essai nº 2	29
6	Données sur le gaspillage de l'eau obtenues lors de l'essai nº 3	31
7	Données sur le gaspillage de l'eau obtenues lors de l'essai nº 4	34
8	Coût estimatif des divers dispositifs d'écoulement continu dans les conduites de distribution	42
9	Comparaison économique des divers dispositifs d'écoulement continu dans les conduites de distribution	43

1 INTRODUCTION

1.1 Historique de la mise au point de dispositifs de protection contre le gel

Les premiers services municipaux d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux usées, mis sur pied dans les régions septentrionales de l'Amérique du Nord, étaient assurés par le transport par véhicule (Dawson et Cronin, 1977). La croissance de la population et l'octroi de subventions par le gouvernement amenèrent la construction de réseaux de captage et de distribution d'été, installés au niveau du sol ou enterrés superficiellement. La plupart des collectivités se fixaient cependant pour objectif de se doter de réseaux de canalisations pour l'adduction d'eau, semblables à ceux qui existent dans les régions plus tempérées (Alter, 1974; Yates et Stanley, 1963; Stanley, 1965; Raniga, 1980). Les réseaux de canalisations sont préférables au système de camionnage pour de nombreuses raisons. Grainge (1969a, 1969b) estime que les réseaux de canalisations servant à la distribution de l'eau et à l'évacuation des eaux usées sont plus efficaces parce que:

a) l'eau transportée est en général moins contaminée lorsqu'elle arrive chez le consommateur;
b) le coût de l'eau étant moindre, on peut l'utiliser plus librement pour la toilette ou la lessive;
c) les risques de déversement accidentel des eaux d'égout sont nuls.

L'apparition dans les régions septentrionales de stations de distribution de l'eau et d'évacuation des eaux d'égout par canalisations posa cependant un certain nombre de problèmes. En tête de liste figuraient le gel des conduites (Dickens, 1959; Grainge, 1958; Alter, 1963; Dawson et Cronin, 1977) et, dans les régions où le pergélisol est constitué pour une large part de glace, l'instabilité du sol (Alter, 1950; Yates et Stanley, 1963; Grainge, 1959).

Pour assurer les usagers d'un approvisionnement sûr et fiable en eau potable dans les régions arctiques de l'Amérique du Nord, on a utilisé au fil des ans plusieurs types de tuyauterie comportant des dispositifs de protection contre le gel. Diverses méthodes de classification de ces réseaux ont été proposées par de nombreux auteurs (Yates et Stanley, 1963; Stanley, 1965; Alter, 1963; Grainge, 1969; Murphy et Hartman, 1969; Dawson et Cronin, 1977). On trouvera ci-après une liste des réseaux qui ont été jusqu'ici exploités avec succès, seuls ou combinés:

a) le réseau à canalisation unique ou double et avec recirculation de l'eau;
b) le réseau classique sans recirculation de l'eau qui fournit de gros consommateurs, situés aux extrémités des canalisations d'alimentation;
c) le réseau "utilidor", qu'on enterre ou qu'on installe au niveau du sol ou au-dessus;
d) le réseau de tuyaux en polyéthylène, rigide, isolé et enterré superficiellement;
e) les canalisations d'alimentation et de distribution munies de câbles chauffants;
f) le réseau classique sans recirculation de l'eau dont l'écoulement continu permet de maintenir le débit.

Dans les réseaux à recirculation de l'eau, c'est le déplacement continuel de l'eau dans les canalisations qui empêche le gel. L'efficacité de ce système tient à ce que, s'il est conforme aux spécifications de conception, l'eau circulant dans les conduites d'alimentation n'atteint jamais une température inférieure au point de congélation avant de

retourner aux pompes principales, où elle est réchauffée. Ainsi, les pertes nettes de chaleur, à quelque endroit que ce soit le long de la canalisation, ne sont jamais assez élevées pour permettre à la glace de se former. On peut aussi ajouter, en certains points du circuit, des dispositifs qui réchauffent l'eau. Il existe deux types fondamentaux de réseaux à recirculation de l'eau: le réseau à canalisation double et le réseau à canalisation unique.

Le réseau à canalisation double est constitué de deux canalisations, installées côte à côte. La première canalisation, qui fonctionne à haute pression, sert à distribuer l'eau aux consommateurs. Des branchements amènent l'eau aux édifices; leur pression est réduite au moyen d'un détendeur (orifice, soupape, etc.); l'eau inutilisée se déverse dans la seconde conduite, qui fonctionne à pression plus basse. L'eau consommée est enlevée à la fin de son circuit. Pendant ce temps, la conduite à pression plus basse retourne l'eau non consommée à la station de pompage principale ou vers une installation de transition où elle est réchauffée au besoin avant d'être retournée dans le réseau de distribution à haute pression.

Le réseau à canalisation double à recirculation possède, entre autres, les caractéristiques suivantes:

a) le tracé du réseau peut être semblable à celui des réseaux enterrés superficiellement;
b) les frais d'installation de ce réseau, qui exige deux fois plus de tuyaux, sont près de deux fois plus élevés que ceux des réseaux classiques (Murphy et Hartman, 1969), même si on peut utiliser des tuyaux de petites dimensions pour la canalisation de retour et installer les deux canalisations dans la même tranchée;
c) en raison de l'espace plus important qu'exigent les deux séries de canalisations, la consommation d'énergie est supérieure à celle des réseaux classiques (Smith et coll., 1979);
d) les mécanismes de réglage de ce type de réseau sont plutôt complexes; on doit également veiller à ce que la pression dans les conduites soit toujours maintenue (Murphy et Hartman, 1969). Comme les variations de la consommation provoquent une stagnation de l'eau en certains endroits et à certaines heures, on doit installer, à intervalles réguliers entre les deux canalisations, des soupapes à solénoïde commandées par thermostat et qui permettent de court-circuiter le réseau (Smith et coll., 1979).

Le second type de réseau de recirculation est le réseau de distribution à canalisation unique. Il s'agit d'une canalisation dans laquelle l'eau circule continuellement. Le tracé du réseau est constitué de boucles ayant pour point de départ l'installation de pompage et de chauffage; la section de retour de chaque boucle est également utilisée pour alimenter les usagers.

Dans certains réseaux à canalisation unique, on maintient un débit suffisant pour empêcher le gel des branchements, en utilisant des "pitorifices"; il s'agit d'un dispositif mis au point grâce aux recherches effectuées par le capitaine W.B. Page, de l'Arctic Health Research Center, au Public Health Service des États-Unis (Page, 1954a, 1954b), d'après un concept présenté par A.J. Alter (Alter, 1950, 1979). Chaque "pitorifice" est constitué d'un tronçon de tuyau auquel on a donné, à une extrémité, la forme d'une lèvre ou d'une cuiller (voir figure 1). Les deux "pitorifices" sont installés à chacune des extrémités de la boucle de distribution, entre l'habitation et la conduite d'alimentation, à laquelle ils sont d'ailleurs branchés; ils servent de robinets de prise, l'ouverture de l'un des "pitorifices" étant orientée vers l'aval, celle de l'autre vers l'amont. C'est la charge due à la vitesse dans la conduite principale qui permet de maintenir le débit dans la boucle de distribution.

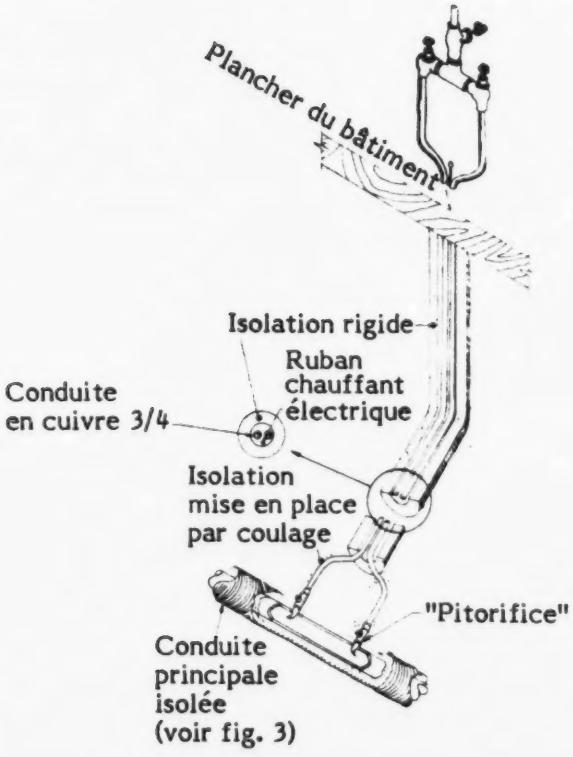

FIGURE 1 MODÈLE D'INSTALLATION D'UN BRANCHEMENT MUNI DE "PITORIFICES" (Ryan, 1973)

Il existe cependant, en ce qui concerne la longueur des branchements, certaines limites au-delà desquelles on ne peut utiliser les "pitorifices" avec succès; on doit également maintenir une vitesse minimale dans la conduite d'alimentation. Signalons que le corps des ingénieurs de l'armée américaine a poursuivi les travaux de pionnier de W.B. Page en effectuant notamment des recherches poussées sur les "pitorifices" et leur calibrage (Johnson, 1979).

Nombreux sont ceux qui croient que c'est le réseau à canalisation unique avec recirculation qui peut le mieux répondre aux besoins courants dans les régions arctiques; c'est d'ailleurs ce réseau qu'on recommande généralement (Murphy et Hartman, 1969; Smith et coll., 1979). Il comporte, entre autres, les caractéristiques suivantes:

a) Le tracé du réseau doit comporter une ou plusieurs boucles. Pour obtenir le pompage et les longueurs de conduite les plus efficaces possibles, on utilise de préférence un tracé circulaire dense autour de l'installation centrale de pompage ou de chauffage; un tel tracé oblige naturellement les urbanistes à éliminer certaines particularités de l'aménagement comme les culs-de-sac (Grainge, 1969a). Pour éviter de telles contraintes, on peut toujours installer des sous-réseaux à canalisation double qu'on branche à la boucle principale, ce qui permet de desservir des zones jusqu'où il serait peu pratique d'étendre le circuit principal (Smith et coll., 1979).

b) Les mécanismes de réglage du réseau sont plus simples que ceux du réseau à canalisation double. Les seules mesures dont on a besoin sont celles du débit et de la température à la station principale ou aux stations de pompage-relais (Murphy et Hartman, 1969; Smith et coll., 1979).

c) Si on veut réaliser des écoulements de protection de la boucle de distribution d'une installation munie de "pitorifices", on doit maintenir une certaine vitesse d'écoulement dans la conduite principale. Comme le tracé du branchement comporte une boucle, la longueur réelle de la tuyauterie exposée aux conditions ambiantes du sol équivaut au double de la distance entre le bâtiment desservi et la conduite d'alimentation. En se fondant sur des conditions présumément stables du sol et de la température pour la ville de Fairbanks, Page a calculé qu'une vitesse d'écoulement de 0,05 m/s dans la conduite de distribution, produite par une vitesse de 0,61 m/s dans la conduite principale, devrait suffire pour empêcher l'eau de geler dans une conduite longue de 30,5 m (prise et retour) (Page, 1954b).

d) Comme le tracé du réseau est constitué de boucles, toute fermeture causée par un problème survenant à un endroit donné le long de la conduite peut théoriquement entraîner une interruption du service sur toute l'étude de la boucle. Dans la pratique cependant, les sections temporaires de jonction, que l'on construit lorsqu'on prolonge une boucle et qui sont normalement fermées, peuvent être utilisées pour contourner les zones où se situe le problème (Smith et coll., 1979).

Les réseaux à recirculation de l'eau, qui ont été installés jusqu'ici dans l'Arctique, étaient généralement des réseaux à canalisation unique. Cela tient à ce que les deux types de réseaux (à canalisation unique et à canalisation double) ont été mis au point à la même époque et que le réseau à canalisation unique présente d'indéniables avantages par rapport à l'autre. En Alaska, l'usage des "pitorifices" est très répandu dans ce type de réseau. Au Canada, on a plutôt recours à d'autres méthodes, comme l'installation de pompes qui assurent la recirculation de l'eau dans la boucle de distribution, dans la partie chaude du bâtiment (Whyman, 1979).

Le deuxième type de réseau de distribution dont nous allons parler est un réseau classique qui dessert de gros consommateurs situés aux extrémités des conduites principales de distribution (Smith et coll., 1979). Le procédé assure un certain degré de protection aux réseaux classiques installés dans un sol sujet au gel, en maintenant un écoulement d'eau relativement continuel, sans recirculation.

Nombre de réseaux de ce type ont été installés au Groenland par l'Organisation technique du Groenland (OTG). L'OTG coordonne tous les aspects de l'installation des services publics avec les nécessités de l'aménagement des villes. Les seize villes du Groenland ont toutes été dotées de réseaux de distribution en conduites; on notera cependant que, dans chaque cas, seuls les gros consommateurs (hôpitaux, usines et immeubles) sont branchés directement à la conduite principale. Tous les autres usagers sont alimentés par un réseau de canalisations en été et par un système de transport par véhicule en hiver (Rosendahl, 1980).

Au Groenland, les conduites de distribution de l'eau sont enterrées, lorsque c'est possible, en dessous de l'épaisseur de gel (environ 2 m); dans les zones de pergélisol, les conduites sont isolées et protégées par une enveloppe de plastique ou de métal. On utilise, de façon générale, un tuyau en fonte ductile, qu'on isole au besoin de mousse de polyuréthane et qu'on recouvre d'une enveloppe de polyéthylène boudiné à chaud, à haute densité. Si on a besoin d'une protection additionnelle contre le gel, on peut noyer dans l'isolation un câble chauffant. Ce câble est commandé par des thermostats électroniques très sensibles, qui permettent au réseau de fonctionner à des températures très proches du point de congélation.

Le troisième type de protection contre le gel qu'on a mis au point a été l'utilidor. Il s'agit d'une conduite dans laquelle on regroupe différents éléments de services publics comme les tuyaux d'adduction de l'eau, les tuyaux d'égout, les tuyaux de chauffage central, les fils électriques, les lignes téléphoniques et les conduites transportant le combustible. Il existe un grand nombre de constructions différentes pour les canalisations de type utilidor (formes, tracé et dimensions). Ils peuvent être installés en zones de pergélisol ou en zones de sol ordinaire, soit enterrés, soit installés au niveau du sol ou au-dessus. On réalise les branchements en prolongeant le réseau jusqu'à chaque bâtiment desservi (on appelle ce prolongement une utilidette) ou par le biais de conduites communes regroupées en faisceau.

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour protéger contre le gel les conduites d'adduction de l'eau dans les canalisations de type utilidor. La plus courante consiste à les placer près des conduites de chauffage central. Notons que l'installation d'un chauffage central permet d'éliminer les chaudières et les réservoirs de combustible, qui sont moins efficaces et qui comportent des risques d'incendie. Le réglage de la température des conduites d'adduction de l'eau est cependant difficile lorsque le chauffage central fonctionne en permanence. En effet, pendant l'été, les températures ambiantes augmentent à l'intérieur du réseau; on ne peut alors tirer que de l'eau chaude du robinet, à moins de faire couler l'eau pendant un certain temps.

D'autres méthodes de protection des canalisations contre le gel ont été mises au point pour les canalisations de type utilidor. L'utilisation d'un câble chauffant et la recirculation de l'eau en sont des exemples. À la base Alert des Forces canadiennes sur l'île Ellesmere, on a placé une conduite principale unique comportant une boucle de recirculation, à l'intérieur d'un "utilidor" isolé et installé au niveau du sol dans une boîte de bois. Deux câbles chauffants de secours ont été placés à l'intérieur de l'utilidor (Chong et Mattes, 1980a, 1980b).

Les canalisations de type utilidor sont à présent remplacées par des réseaux enterrés superficiellement, dont les tuyaux rigides et isolés en usine sont faits de polyéthylène à haute densité. La protection contre le gel dans ce type de réseau est habituellement assurée par la recirculation de l'eau dans une canalisation unique; pour les branchements, on utilise soit une canalisation unique munie d'un câble chauffant, soit une canalisation double munie de "pitorifices" ou de pompes de recirculation dans chaque immeuble. On assure la protection de soutien contre le gel ou la capacité de dégel des conduites principales en installant des câbles chauffants ou des tubes de dégel.

Les tuyauteries préfabriquées et pré-isolées posent cependant certains problèmes, notamment lorsqu'il s'agit de sceller les joints du conduit extérieur du câble chauffant. Des cas de pénétration de l'eau dans le conduit ont été rapportés dans certaines installations, par exemple à Resolute et à Rankin Inlet (Whyman, 1980). Comme les tuyaux de polyéthylène à haute densité utilisés dans ce type de tuyauterie peuvent supporter le gel de l'eau sans risque d'être endommagés, on a éliminé les câbles chauffants des réseaux d'alimentation les plus récents.

L'installation de câbles chauffants a constitué pendant longtemps une technique reconnue de protection contre le gel des réseaux d'adduction de l'eau dans les régions nordiques. Aujourd'hui, on utilise plutôt des fils à résistance électrique, qui servent à dégeler les conduites et non à en empêcher le gel. De même, les câbles chauffants dont on a muni les conduites ne servent plus généralement que de dispositifs de protection de soutien. Le coût de l'électricité utilisée pour le chauffage des conduites principales est élevé, mais on élimine ainsi les frais importants reliés au pompage et on peut utiliser un réseau de type classique pour l'adduction de l'eau.

En raison de la taille plus réduite des tuyaux, des vitesses d'écoulement moins élevées et des possibilités de stagnation de l'eau pendant de longues périodes, les branchements individuels sont habituellement considérés comme les points névralgiques

des réseaux d'adduction de l'eau. L'installation de câbles chauffants dans les branchements est une pratique très courante dans les régions arctiques et subarctiques. Un grand nombre des problèmes reliés à l'installation de câbles chauffants dans les conduites d'alimentation ne se posent pas en ce qui concerne les conduites de distribution. Les branchements ne sont habituellement pas très longs, ils varient entre 15 et 30 mètres; le fonctionnement des câbles chauffants peut être adapté à chaque emplacement. On peut aussi facturer les frais d'exploitation directement au consommateur. Les câbles chauffants des conduites de distribution sont souvent installés sans thermostat, le réglage s'effectuant manuellement. Il s'ensuit qu'on laisse souvent chauffer le câble pendant toute la période de gel possible des conduites. Une telle pratique constitue un véritable gaspillage. À Frobisher Bay, on a installé des câbles chauffants sans thermostat, que des commutateurs actionnent dès qu'il y a stagnation de l'eau (James, 1980a).

L'écoulement continu de l'eau dans les conduites est peut-être la méthode de protection la plus simple contre le gel dans les réseaux de distribution. Sous sa forme la plus grossière, cette méthode consiste à laisser couler l'eau directement des robinets des bâtiments dans les émissaires. On peut aussi installer des branchements latéraux spéciaux d'écoulement continu, qui font passer l'eau de la conduite de distribution dans un drain d'égout. Afin d'éviter la stagnation, on assure également l'écoulement continu de l'eau aux extrémités des conduites d'alimentation et dans les bouches d'incendie installées hors circuit.

Les dispositifs d'écoulement continu fonctionnent selon le même principe que les dispositifs de recirculation. L'eau qui circule dans les tuyaux est continuellement remplacée par de l'eau dont la capacité calorifique est plus élevée. Dans des conditions d'équilibre, l'eau qui circule dans une section de tuyau aura, après avoir franchi la section, une capacité calorifique un peu plus basse; les pertes de chaleur nettes dans une section de tuyau donnée ne sont cependant jamais assez élevées pour que l'eau y gèle. L'arrivée continuelle de l'eau, et donc de la chaleur, dans le réseau est assurée par un écoulement continu dans les branchements et dans les culs-de-sac.

Les dispositifs d'écoulement continu comportent, entre autres, les caractéristiques suivantes:

a) La mise en place de ces dispositifs entraîne une consommation d'eau par habitant très élevée (voir le tableau 1). Hanson (1975), qui a étudié la consommation d'eau dans un certain nombre de municipalités de l'Alaska, a découvert que le débit moyen variait entre 378 litres/personne/jour (100 gallons US/personne/jour) à Fairbanks et 4163 litres/personne/jour (1100 gallons US/personne/jour) à Seward. Il a attribué les débits élevés, à l'extrémité supérieure de l'échelle, à l'écoulement continu de l'eau dans les conduites afin d'empêcher le gel. Les statistiques présentées par Armstrong et Given (1979), à partir d'un certain nombre de sources portant sur les communautés qui appliquent la méthode de l'écoulement continu, révèlent également des taux élevés de consommation par habitant (jusqu'à 9080 litres/personne/jour).
b) En raison de la forte consommation d'eau, on doit construire de plus gros réseaux d'égouts et d'adduction d'eau. On a besoin de tuyaux, de pompes et de réservoirs de plus grande capacité pour la distribution de l'eau, ainsi que de plus grandes installations de traitement de l'eau. On peut aussi avoir besoin de pompes, de tuyaux et d'installations d'épuration de l'eau usée de plus grande capacité pour faire face au volume plus considérable d'eau d'égout. Les dépenses d'investissement, d'exploitation et d'entretien de ces dispositifs sont donc beaucoup plus élevées.
c) L'utilisation de l'écoulement continu fonctionnant à l'échelle d'une communauté présuppose la présence d'une source importante et facilement accessible d'eau potable.

Tableau 1 **Consommation d'eau dans certaines communautés septentrionales où l'écoulement continu* est utilisé**

Lieu	Consommation l/pers./jour	Pourcentage de la consommation de référence	Observations	Référence
Territoires du Nord-Ouest				
Yellowknife	485	115	partie de la communauté approvisionnée par canalisations	Smith et coll. 1979
Pine Point	590	140	moyenne quotidienne janv.-nov. 1975	Reid Crowther & Partners Ltd., 1977
	1160	276	période de pointe quotidienne	
Territoire du Yukon				
Clinton Creek	1185	285	moyenne annuelle	Stanley Assoc. Engineering Ltd., 1974
	680-2270	162-540	amplitude	
Whitehorse	1680	400	moyenne annuelle	
	1135-2500	270-595	amplitude	
Dawson City	3630-9080	865-2162	amplitude	
Dawson City	3890	2120	moyenne quotidienne sept.-avril 1976	Stanley Assoc. Engineering Ltd., 1977
	2410	574	moyenne quotidienne mai-août 1976	
Faro	790	188	moyenne annuelle	Cormie, 1979
Haines Juction	570	136	moyenne annuelle	
Mayo	2730	650	moyenne annuelle	
Watson Lake	820	195	moyenne annuelle	
Alaska				
Anchorage	890	212	moyenne annuelle	Smith et coll., 1979
Dillingham	1630	388	moyenne annuelle	
Fairbanks	650	155	moyenne annuelle	
Homer	1630	388	moyenne annuelle	
Palmer	760	181	moyenne annuelle	
Seldoria	680	162	moyenne annuelle	
Ketchikan	1135	270	moyenne annuelle	Martin, 1979
	660	157	portion écoul. cont.	
Seward	985	235	moyenne annuelle	
	345	85	portion écoul. cont.	
Sitka	1600	381	moyenne annuelle	
	285-380	68-90	portion écoul. cont.	
Wrangell	740	176	moyenne annuelle	
	195	46	portion écoul. cont.	
Consommation de référence	420		taux de consommation d'une communauté type	Hammer, 1977

* Les taux de consommation d'eau sont fort probablement imputables à l'écoulement continu. Le taux d'utilisation élevé peut cependant être attribuable à des défaillances de la tuyauterie du réseau de distribution ou à une consommation élevée.

d) Les communautés septentrionales peuvent installer les réseaux de distribution de l'eau d'une manière classique (Smith et coll., 1979). Il n'y a aucune contrainte particulière touchant l'aménagement urbain, on peut enterrer les tuyaux à des profondeurs minimales, et dans les régions où le pergélisol et son élimination n'entrent pas en jeu, on peut réduire l'isolation des conduites au minimum.

e) L'écoulement continu produit des quantités considérables d'eaux usées. Ces eaux sont froides, diluées et, par conséquent, difficiles à traiter, ce qui nuit à tous les procédés physiques, biologiques et chimiques, comme la précipitation (Alter, 1950, 1979; Smith et coll., 1979; Given et Smith, 1979; Smith et Given, 1979, 1980; Balmer, 1980). Martin (1979) signale que le gouvernement américain exige que les usines de traitement éliminent 85 p. 100 de la D.B.O. et des matières en suspension dans l'eau; si une telle exigence ne pose aucun problème dans le cas des eaux d'égout normales contenant 200 mg/l de D.B.O., elle en pose lorsque l'eau d'égout est diluée et ne contient plus que 100 mg/l de D.B.O. Dans le premier cas, la quantité de D.B.O. dans l'effluent doit être réduite à 30 mg/l; dans le second, elle doit être réduite à 15 mg/l. Hanson (1975) a aussi émis l'hypothèse que la température plus basse des eaux usées pourrait rendre les conduites d'égout plus sujettes au gel.

f) Dans les communautés qui appliquent la méthode de l'écoulement continu, la consommation d'eau exagérée tend à être considérée comme normale. Les dispositifs d'écoulement continu qui sont mis en marche pour empêcher les défaillances hivernales des conduites de distribution sont fréquemment, par habitude ou par négligence, laissés ouverts pendant les mois d'été quand l'écoulement continu n'est plus nécessaire. Cette pratique a été observée à Dawson City, au Yukon (Stanley Associates Engineering Limited, 1977) et on soupçonne qu'elle existe à Seward, en Alaska (Hanson, 1979). Le fait que, dans un grand nombre de ces communautés, l'eau ne soit pas facturée en fonction de la consommation, mais selon un taux mensuel fixe, contribue certes au gaspillage. Là où on a muni les conduites de distribution de câbles chauffants et où l'eau est facturée selon un taux mensuel fixe, il semble plus économique au propriétaire du bâtiment de laisser couler ses robinets que de faire fonctionner son câble chauffant lorsqu'il y a risque de gel.

Dans un grand nombre de communautés qui appliquent la méthode de l'écoulement continu, les réseaux de distribution de l'eau ont été installés à une époque où les sources d'eau potable étaient abondantes et pouvaient être exploitées à peu de frais. Toutefois, en raison de la croissance de la population et de l'expansion des réseaux d'adduction d'eau, on a à présent besoin de volumes considérables d'eau potable pour faire fonctionner des réseaux comme ceux de Mayo, de Whitehorse et de Dawson City au Yukon (Armstrong et Given, 1979). Notons qu'on faisait abstraction, dans l'analyse économique de ces réseaux, des coûts d'épuration de l'eau usée, puisque, dans de nombreux cas, aucun traitement n'était effectué.

Dans certaines localités, l'écoulement continu est toujours considéré comme une méthode économique de protection contre le gel. Un réseau de distribution de l'eau nouveau et complet a été installé récemment à Dawson City, au Yukon. Il fonctionne selon le principe de la recirculation dans les conduites principales d'alimentation; les tuyaux pré-isolés et munis de câbles chauffants sont en polyéthylène à haute densité et sont enterrés superficiellement. On a cependant conservé la méthode de l'écoulement continu pour protéger les conduites de distribution contre le gel. L'effluent d'eau d'égout dilué est rejeté, sans avoir été traité, dans le fleuve Yukon (Shillington et coll., 1981; Shillington, 1981).

Nombre d'auteurs ont présenté au fil des ans des méthodes de calcul du débit d'écoulement continu nécessaire pour empêcher l'eau de geler dans les conduites. Toutes ces méthodes se fondaient sur les équations standards de transmission de la chaleur, qu'on

peut trouver dans des documents comme le Handbook of Fundamentals (1972) de l'ASHRAE. Comme ces équations se prêtaient fort bien aux solutions numériques de forme fermée, on a généralement présumé que les conditions de départ des températures de l'eau, de l'air et du sol, de même que de la conductivité thermique du sol étaient stables. Anderson (1959) et Constance (1964) ont présenté leurs calculs de l'écoulement massique sous la forme de diagrammes faciles à utiliser. Stephenson (1977) est allé plus loin en présentant des formules permettant de calculer les températures des fluides à l'entrée et à la sortie des conduites. Zarling (1979) a modifié les formules standards fournies par l'ASHRAE et touchant le gel des fluides et le temps de chute de la température, en tenant compte de la résistance thermique des parois du tuyau et de la couche d'air et en incorporant dans les formules un terme qu'il appelle la différence de la température moyenne logarithmique (DTML). Thornton (1977) a pour sa part résumé dans un cadre terminologique commun la majorité des équations de transmission de la chaleur en régime permanent sur le débit des fluides dans les conduites.

1.2 Données de base et objectifs de l'étude

L'écoulement continu de l'eau visant à empêcher le gel dans les réseaux de distribution des régions septentrionales accroît de façon considérable les taux de consommation d'eau ainsi que les coûts de pompage et de traitement. Les coûts reliés au captage et à l'épuration de l'eau usée sont eux aussi plus élevés, puisqu'on traite des volumes d'eau beaucoup plus considérables. La présente étude a été entreprise dans le but de trouver des solutions de rechange réalisables sur les plans économiques et techniques et permettant de réduire l'écoulement continu dans les conduites de distribution d'un réseau municipal existant qui utilise cette méthode comme moyen de protection contre le gel.

Le réseau de distribution existant sur lequel nous nous sommes basés est celui de la ville de Whitehorse, au Yukon. La ville proprement dite est construite à environ 640 m au-dessus du niveau de la mer, sur une plaine de gravier elle-même située de 3,0 à 6,1 m au-dessus du niveau du fleuve Yukon, qui traverse la ville en direction est. La température moyenne annuelle dans le centre de la ville est de 1,7 °C et la température moyenne au mois de janvier est de -7,8 °C. Les précipitations moyennes annuelles sont de 26 cm dont 14,2 cm de pluie; les 11,8 cm qui restent forment une couche de neige de 127,7 cm. La période estivale (sans gel) dure 78 jours dans la ville proprement dite et 45 jours dans les sous-divisions situées sur les plateaux. La ville elle-même est bâtie sur un sol qui n'est pas soumis au gel permanent; on trouve cependant des zones de pergélisol dans la région environnante (ville de Whitehorse, s.d.; Lotz, 1961).

D'après le recensement fédéral de 1971, la population de la région métropolitaine de Whitehorse s'élevait à 11 217 habitants; des estimations de 1978, fondées sur le comptage permanent à partir des dossiers d'hygiène publique, établissaient la population à 15 394 habitants.

La région métropolitaine de Whitehorse est approvisionnée pendant toute l'année par l'eau du fleuve Yukon, à laquelle on ajoute du chlore et du fluor. En hiver, on maintient les températures de l'eau dans le réseau en mélangeant des eaux souterraines chaudes à l'eau du fleuve, dans une proportion de 40 à 50 p. 100 du débit total. On réchauffe également l'eau en divers points du réseau. On applique la méthode de l'écoulement continu pour les conduites d'alimentation et les conduites de distribution dans les vieux quartiers de la ville. Dans les nouveaux quartiers, on applique le principe de la recirculation dans les conduites principales et on munit les conduites de distribution de câbles chauffants.

Depuis toujours, le gaspillage (dû aux fuites et à l'écoulement continu) constitue l'un des aspects les plus importants de l'exploitation des réseaux de distribution de l'eau à Whitehorse. Les évaluations du taux de consommation ont varié au fil des ans. En

1963, l'AESL estimait que le débit des dispositifs d'écoulement continu s'élevait à 1363 litres/personne/jour pour la ville de Whitehorse et atteignait 2728 litres/personne/jour à Camp Takhini. La société T.H. Newton Engineering Ltd. (1964) a révisé ces chiffres à la baisse, soit un débit domestique normal variant entre 890 et 1340 litres/personne/jour et un débit hivernal variant entre 1363 et 3800 litres/jour/branchement. Les estimations internes de la ville de Whitehorse fixaient la consommation annuelle moyenne de 1314 litres/personne/jour en 1973 et à 1000 litres/personne/jour en 1978. On a donc relevé au fil des ans une tendance à la baisse sensible de la consommation globale; la mise en place de meilleurs contrôles et l'interdiction d'installer de nouveaux dispositifs d'écoulement continu devraient permettre à cette tendance de se maintenir. Dans la subdivision de Porter Creek, on a noté une tendance inverse; la consommation en effet augmenté, entre 1972 et 1978, de 400 litres/personne/jour à 1050 litres/personne/jour (AESL, 1979). Cette augmentation est peut-être attribuable à l'installation, au milieu des années 1970, d'un réseau de captage des eaux d'égout.

Le taux apparemment exagéré de consommation de l'eau à Whitehorse constitue depuis le milieu des années 1960 un problème préoccupant. En 1964, la société T.H. Newton Engineering Ltd. a recommandé que des mesures soient prises pour diminuer de façon draconienne la consommation d'eau. Depuis lors, plusieurs autres firmes d'experts-conseils ont fait écho à cette recommandation dans leurs rapports (AESL, 1967, 1969, 1979). Tout en admettant généralement que l'écoulement continu constitue, pour le réseau existant, la méthode la plus facilement réalisable de protection contre le gel, les auteurs ont plutôt insisté sur le maintien de l'écoulement continu dans les branchements domestiques à un niveau donné, qui est généralement de 1,1 litre/minute (T.H. Newton Engineering Ltd., 1964) ou de 1,5 litre/minute (AESL, 1967).

Les estimations pour l'année 1978, établies par le département de génie de la ville et fondées sur les relevés de débit et sur le comptage de la population à partir des dossiers d'hygiène publique, fixent à environ 1090 litres la consommation quotidienne moyenne par habitant. Si on établit à 450 litres/personne/jour la consommation d'eau réelle dans un réseau typique du sud (le chiffre étant tout de même élevé, puisque l'activité industrielle à Whitehorse est plutôt réduite - Reid, Crowther & Partners Limited, 1970), on peut alors imputer au gaspillage (écoulement continu et fuites) un débit de 640 litres/personne/jour, soit 59 p. 100 du débit total. Si on se fonde sur un chiffre plus réaliste de 227 litres/personne/jour (AESL, 1967), c'est 79 p. 100 du débit total qui peut alors être considéré comme gaspillé.

S'il a été assez facile d'établir les taux de consommation d'eau pour la ville de Whitehorse, il s'est avéré beaucoup plus difficile de distinguer le débit attribuable à l'écoulement continu du débit attribuable aux fuites. Celles-ci constituent un problème majeur dans le réseau de distribution de Whitehorse; malheureusement, en raison de la grande perméabilité du sol (T.H. Newton Engineering Ltd., 1964), on n'a pas pu jusqu'ici établir l'ampleur de ces fuites.

Le dispositif d'écoulement continu typique d'un bâtiment de Whitehorse est constitué par un branchement de cuivre de 12,7 mm de diamètre intérieur qui va de la conduite de distribution jusqu'au bâtiment (voir figure 2). La conduite de cuivre qui amène l'eau au drain d'égout ne mesure que 6,4 mm de diamètre extérieur. Les règlements municipaux exigent qu'il y ait un intervalle d'air entre le drain et le dispositif d'écoulement continu, ce qui n'est peut-être pas toujours le cas. Le débit est habituellement maintenu au moyen d'un robinet de prélèvement ou d'un robinet-vanne.

Les dispositifs d'écoulement continu sont habituellement constitués de branchements de 12,7 mm qui tirent l'eau de la conduite d'alimentation ou d'une prise d'eau. Ils passent par un trou d'homme dans la conduite d'égout principale; leur réglage est assuré par des robinets d'arrêt munis de soupapes casse-vide.

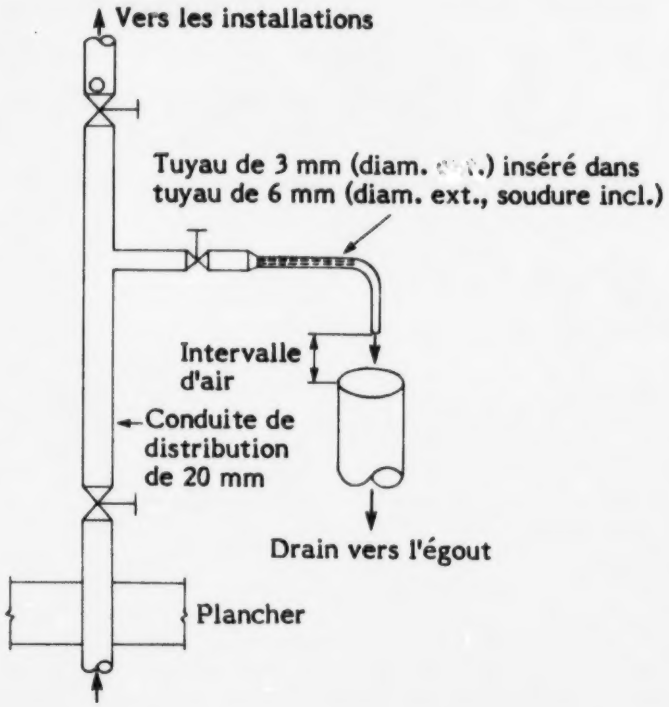

FIGURE 2 MODÈLE DE DISPOSITIF D'ÉCOULEMENT CONTINU D'UNE MAISON DE WHITEHORSE

La qualité de l'installation de la plomberie et du dispositif d'écoulement continu varie considérablement. Dans certains cas, elle a été réalisée par des bricoleurs ou modifiée par des gens qui ignoraient les normes relatives à la plomberie et à l'hygiène publique ou qui ne s'en préoccupaient pas. Au nombre des problèmes rencontrés figurent les commandes inutilisables, les jonctions fautives et les modifications qui, en cas d'écoulement inversé, risquent de contaminer les services d'eau publics. Des situations similaires ont été observées dans les trous d'homme.

Le règlement municipal nº 180 de la ville de Whitehorse stipule que le débit d'écoulement continu doit être limité à 1/3 de gallon anglais par minute (1,5 litre/minute). Toutefois, comme le réglage du débit se fait habituellement à la main selon la pratique antérieure ou selon ce qui "semble à peu près juste" au propriétaire du bâtiment, les débits varient considérablement. L'utilisation d'un robinet de prélèvement ou d'un robinet-vanne ne facilite pas le réglage du dispositif d'écoulement continu à un débit donné, puisque le propriétaire doit d'abord mesurer avec précision le débit de l'écoulement. Une montre et un contenant gradué suffisent pour effectuer ce calcul, mais nombre de gens trouvent cette méthode trop fastidieuse. Il peut aussi être difficile de régler avec précision le débit d'écoulement continu des dispositifs installés sur les conduites d'alimentation.

Le tableau 2 donne les débits d'écoulement continu observés et les endroits où ces observations ont été faites. On peut supposer que, dans bon nombre d'endroits, on maintenait un débit supérieur à celui qui suffit pour empêcher l'eau de geler. Si ces observations s'appliquent à l'ensemble des dispositifs d'écoulement continu, le gaspillage de l'eau est énorme.

Tableau 2 Débit des dispositifs d'écoulement continu de Whitehorse

Endroit	Taux d'écoulement continu de l'eau		Nombre d'endroits	
	Amplitude	Moyenne	Examinés	Débit vérifié
Bâtiments municipaux	0,32 - 5,23	2,02	5	4
Trous d'homme	15 - 40	28,3	3	3
Bâtiments commerciaux	0,50 - 4,54	2,43	6	5
Maisons privées	0,82 - 7,50	3,07	16	14
Bâtiments publics	0,25 - 20	6,75	7	4
	moyenne =	5,84	$\sum$ = 37	$\sum$ = 30

Les études sur l'écoulement continu effectuées par la ville en 1974 et 1975 avaient pour objet d'obtenir un relevé précis des compteurs et des dispositifs d'écoulement continu existants. On s'est notamment efforcé de déterminer le nombre de dispositifs d'écoulement continu dont les dimensions étaient trop importantes; pour les services résidentiels, il s'agissait de tuyaux de cuivre de plus de 3,2 mm de diamètre extérieur et 1,6 mm de diamètre intérieur dont le débit d'écoulement continu était supérieur à 1,5 litre/minute. Les études ont révélé que les débits moyens des dispositifs d'écoulement continu des prises d'eau et des culs-de-sac étaient respectivement de 3,4 et de 6,8 litres/minute.

Par les journaux et par des avis dans d'autres media, les autorités de la ville de Whitehorse informent les propriétaires de dispositifs d'écoulement continu du moment où ils doivent mettre en marche et fermer leur dispositif. Malheureusement, par négligence ou à cause de l'absence d'un stimulant économique, certains dispositifs sont fermés longtemps après que l'avis a été donné ou même sont laissés ouverts pendant toute l'année. C'est sans doute le cas, en particulier, des dispositifs comportant un branchement direct entre la conduite de distribution et le drain d'égout, car ils sont beaucoup moins visibles. Les études ont également révélé l'existence d'un nombre considérable de robinets qui fuient, ce qui occasionne un gaspillage énorme de l'eau de consommation.

Les dispositifs d'écoulement continu déversent des quantités considérables d'eau usée froide et diluée dans le réseau d'égouts de Whitehorse. Il est évident qu'une portion importante de ce volume d'eau est imputable non pas aux dispositifs d'écoulement continu, mais à l'infiltration des eaux souterraines dans les canalisations d'égout principales. Il n'en demeure pas moins que ce volume d'eau surcharge les canalisations, ce qui provoque des inondations dans les sous-sols et accroît grandement le coût du pompage des eaux d'égout (AESL, 1979; Foster, 1980).

Les données de base qui ont servi à choisir et à évaluer les différentes méthodes de réduction du gaspillage de l'eau de consommation ont été tirées du réseau de distribution d'eau de la ville de Whitehorse. Divers dispositifs de commande de l'écoulement continu ont été découverts et on a fait des tests en laboratoire portant sur leur rendement dans des conditions simulées, leur efficacité et les possibilités d'installation à un coût raisonnable dans un dispositif d'écoulement continu existant.

2 DÉCOUVERTE ET ESSAI DE NOUVEAUX DISPOSITIFS DE COMMANDE DE L'ÉCOULEMENT CONTINU

2.1 Examen initial et choix des nouveaux dispositifs

À partir des caractéristiques du réseau d'adduction d'eau de Whitehorse et de l'examen des aspects économiques et techniques de la protection contre le gel, nous avons mis au point les critères suivants pour le choix des dispositifs à éprouver en laboratoire:

1) Les nouveaux dispositifs doivent être compatibles avec l'infrastructure existante et ne pas nécessiter une reconstruction importante.
2) L'installation des nouveaux dispositifs ne doit comporter aucun risque de contamination des services d'eau publics.
3) Idéalement, l'installation des nouveaux dispositifs doit être facile et rapide et leur fonctionnement doit être assuré par commande centrale ou automatique. Comme chaque branchement du réseau de distribution est muni d'un dispositif distinct d'écoulement continu, on a reconnu que l'installation pourrait exiger un investissement important. Dans tous les cas, la participation du propriétaire à la commande du dispositif devrait se limiter à l'ouverture ou à la fermeture, deux fois l'an, d'un robinet et d'un commutateur. Le laps de temps s'écoulant entre chaque visite d'entretien devrait également se compter en années.
4) Le coût des dispositifs de commande doit être raisonnable.

Nous n'avons trouvé, dans la documentation sur le sujet, qu'une seule étude relative aux solutions de rechange pour limiter l'écoulement continu. Ainsi, Armstrong et Given (1979), après avoir discuté avec diverses personnes et en utilisant un ensemble de critères légèrement différent du nôtre, ont découvert un certain nombre de solutions de rechange pour limiter l'écoulement continu dans les conduites de distribution. On en trouvera la liste au tableau 3. Nous avons donc commencé par évaluer les solutions présentées par Armstrong et Given. Nous avons d'abord éliminé la solution du statu quo (c'est-à-dire le maintien tel quel de l'écoulement continu). L'étude en laboratoire de certaines des solutions posait par contre des problèmes évidents.

La solution des "contrôles ponctuels comportant des sanctions", pour ceux dont les dispositifs d'écoulement continu ont un débit trop élevé ou fonctionnent lorsque ce n'est pas nécessaire, a été éliminée parce qu'elle ne pouvait être éprouvée que sur le terrain.

De même, la solution comportant l'installation de compteurs d'eau et la mise sur pied d'une structure de tarification fondée sur la consommation d'eau fut rejetée parce qu'elle n'entrait pas dans le cadre de la présente étude, même si elle constitue sans aucun doute un stimulant assez puissant pour inciter les gens à économiser l'eau (Cameron et Armstrong, 1979). Il aurait fallu de toute façon éprouver la solution sur le terrain et il est certain que la population de cette région, habituée à un tarif forfaitaire pour la consommation d'eau, réagirait négativement à tout projet d'installation de compteurs d'eau. Tous les documents faisant autorité dans le domaine du génie municipal (Fair, Geyer et Okun, 1966; Clark, Viessman et Hammer, 1971) affirment cependant que l'installation de compteurs tend à réduire la consommation d'eau.

En raison du coût élevé des excavations, l'installation de câbles chauffants à l'extérieur des conduites de distribution existantes ne pourrait sans doute être réalisée que si ces conduites devaient être réparées ou remplacées. De toute façon, on n'a pas jugé nécessaire d'éprouver en laboratoire les câbles chauffants dont l'efficacité est déjà reconnue.

Tableau 3 Solutions permettant l'élimination des dispositifs d'écoulement continu dans les conduites de distribution ou la réduction de leur débit
(Armstrong et Given, 1979)

Numéro	Description
	Avec écoulement continu
1A	Écoulement continu sans restriction
1B	Contrôles ponctuels comportant des sanctions
1C	Installation de compteurs
1D	Dispositif de restriction du débit d'écoulement continu
1E	Soupape commandée par thermostat
1F	Soupape commandée par minuterie
	Sans écoulement continu
2A	Câble chauffant dans la conduite de distribution
2B	Recirculation au moyen d'un tube de plastique
2C	Recirculation avec le bâtiment voisin
2D	Recirculation par le biais d'un réservoir installé dans le bâtiment
2E	Remplacement des conduites de distribution

Aucune excavation ne serait cependant nécessaire si les câbles chauffants étaient installés à l'intérieur des conduites de distribution existantes. On obtiendrait d'ailleurs, avec ce type d'installation, une efficacité thermique maximale. Malheureusement, depuis 1979, aucun câble chauffant à chaleur constante watt/pied offert sur le marché n'a reçu l'approbation de l'ACNOR pour ce qui est de l'utilisation sous l'eau (Whyman, 1979). Il serait également difficile de réaliser des joints étanches si jamais on devait contourner des soupapes ou d'autres dispositifs. Il existe des câbles de résistance à isolant minéral, qu'on peut immerger dans les conduites, mais il faut que la boucle de retour soit placée à l'extérieur du tuyau (Armstrong et Given, 1979), ce qui exige des excavations. Il serait alors plus facile d'installer un câble chauffant.

La solution fondée sur la "recirculation avec le bâtiment voisin" consisterait à créer une boucle de recirculation fonctionnant au moyen d'une pompe entre des bâtiments voisins, l'eau étant ensuite retournée dans la conduite principale. On n'a pas jugé bon d'étudier cette solution en laboratoire, puisque la technique de la recirculation de l'eau dans les conduites de distribution a déjà fait ses preuves. Il est à noter que cette solution soulève un problème quant au partage des coûts et à la responsabilité de la commande du dispositif, lorsque deux bâtiments voisins ont des propriétaires différents. Nous avons aussi jugé qu'il s'agissait encore là d'un problème d'infrastructure qui n'entrait pas dans le cadre de la présente étude.

La solution comportant la "recirculation au moyen d'un tube de plastique" consistait à installer un petit tube de plastique ou de cuivre dans la conduite de distribution et à se servir de pompes pour renvoyer l'eau jusqu'à la conduite d'alimentation. Cette solution pourrait comporter certains problèmes: charges de vibration à l'intérieur du tuyau, nécessité d'installer des dispositifs, comme des robinets d'arrêt, permettant de contourner les soupapes à coût élevé de l'installation et de l'exploitation du dispositif.

Après ce premier examen, nous avons décidé d'éprouver en laboratoire les dispositifs suivants:

a) un dispositif de réglage de la température;
b) une minuterie;
c) un diaphragme ou dispositif de restriction du débit;
d) un réservoir qui serait relié à une conduite d'écoulement continu existante, et qui, une fois rempli, se viderait dans un drain d'égout.

Trois de ces quatre dispositifs reposent sur le principe de l'écoulement intermittent; le quatrième, le diaphragme, peut être utilisé pour réduire l'écoulement continu au débit minimal souhaité. Un cinquième dispositif, qui pourrait être appliqué à des industries ou à d'importantes entreprises commerciales, a été choisi plus tard. Il s'agit fondamentalement:

e) d'un vaste réservoir sous pression qui se remplirait d'eau au cours des périodes de haute pression du réseau de distribution de l'eau et qui se viderait dans la conduite d'alimentation lorsque la pression du réseau baisserait.

2.2 Installations du laboratoire

Les essais en laboratoire ont été effectués dans une chambre froide isolée de 1,65 m de largeur, 2,25 m de longueur et 2,13 m de hauteur. Les commandes de réfrigération ont été réglées à -40 °C, mais une vérification préliminaire a permis d'établir que la température interne ne pouvait être maintenue au-dessous de -26 °C environ.

À l'intérieur de la chambre froide, on a installé un ensemble de tuyaux de cuivre parallèles, montés sur des supports de bois et fonctionnant en recirculation (voir figures 3 et 4). On a fait en sorte qu'une portion du réseau de tuyaux se trouve à l'extérieur de la chambre froide. Les températures à l'intérieur de la chambre froide ont été réglées de façon à simuler les conditions inhérentes aux conduites souterraines, tandis que la portion de la tuyauterie située à l'extérieur de la chambre correspondait aux conditions prévalant à l'intérieur d'un bâtiment chauffé.

On a simulé l'isolation des conduites enterrées profondément dans le sol en appliquant de la mousse isolante sur les tuyaux. Toute la tuyauterie intérieure a été recouverte d'une couche de 9,5 mm d'isolant fermé de mousse plastique cellulaire (deux couches ont été appliquées à chaque coude et à chaque raccord). Tous les joints ont été scellés soit avec du ciment de contact, soit avec du ruban à calfeutrer. L'isolation a également contribué à réduire le cycle de température de l'équipement de réfrigération dans la chambre froide. Compte tenu de la quantité d'isolant qu'il était pratique d'appliquer, on n'a cependant pas pu simuler l'effet d'inertie de la température dans les conduites enterrées profondément (il faut en effet un certain nombre de mois au gel pour pénétrer dans le sol jusqu'à une profondeur donnée). Il aurait fallu énormément de temps pour simuler cet effet en laboratoire.

On a commencé par créer un cycle de recirculation en pompant l'eau d'un bain à température constante par un tuyau de cuivre de 25,4 mm de diamètre intérieur, jusque dans la chambre froide. Une fois à l'intérieur, l'eau était distribuée par un distributeur de cuivre à six tuyaux de cuivre de 12,7 mm de diamètre intérieur. Ces tuyaux étaient installés en parallèle et formaient une boucle avant de sortir de la chambre froide. Des robinets-vannes installés sur le distributeur permettaient de régler le débit dans chaque tuyau. À l'extérieur de la chambre froide, on avait installé sur quatre des six tuyaux un dispositif différent de commande de l'écoulement continu; le cinquième tuyau servait de

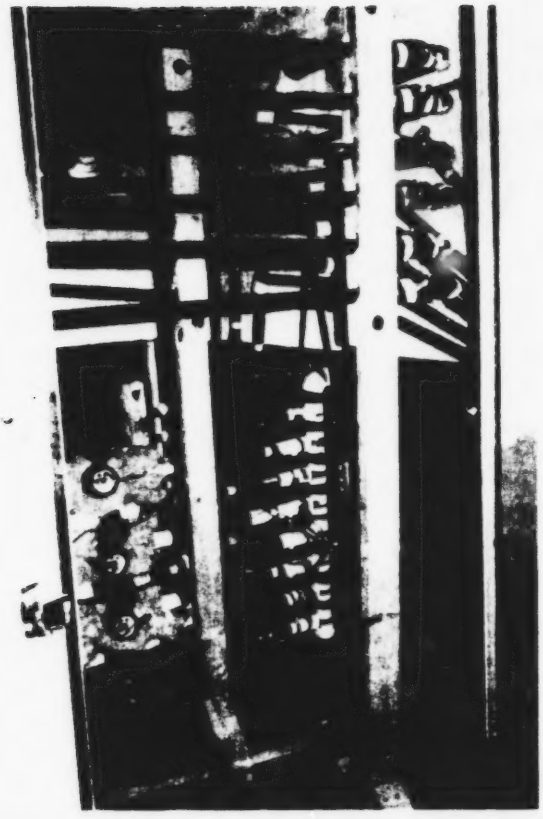

FIGURE 3 TUYAUTERIE À L'INTÉRIEUR DE LA CHAMBRE FROIDE

contrôle de l'écoulement continu (c'est-à-dire que l'écoulement y était constant) et le sixième tuyau était gardé en réserve. Les dimensions des six tuyaux étaient réduites, à l'extérieur de la chambre froide, à 6,4 mm (3,2 mm de diamètre intérieur); l'eau se déversait dans un bassin d'acier inoxydable, isolé et partiellement couvert, puis elle était pompée de nouveau dans le bain à température constante et le cycle recommençait.

Lors des quatre premiers cycles d'essai, on a utilisé quatre dispositifs différents de commande de l'écoulement continu: i) un dispositif de réglage de la température, ii) une minuterie, iii) un diaphragme et iv) un réservoir.

Le dispositif de réglage de la température était conçu de façon à ne permettre l'écoulement continu de l'eau que lorsque la température de la conduite de distribution descendait sous un minimum préétabli. Le dispositif était constitué d'une sonde thermométrique (thermistor) et d'une soupape à solénoïde, interconnectées par une plaque de câblage (voir figure 5). La soupape à solénoïde a été réglée de façon à demeurer en position ouverte en cas de panne de courant. En situation réelle, elle serait placée à l'extrémité de la conduite d'écoulement continu existante, tandis que la sonde thermométrique serait installée quelque part sur la conduite de distribution. L'emplacement idéal (c'est-à-dire le plus froid) pour le thermistor serait celui où la conduite de distribution passe sous un trottoir ou tout autre endroit peu ou pas du tout recouvert de neige. Lors des essais en laboratoire, le thermistor a été installé à l'intérieur de l'une des

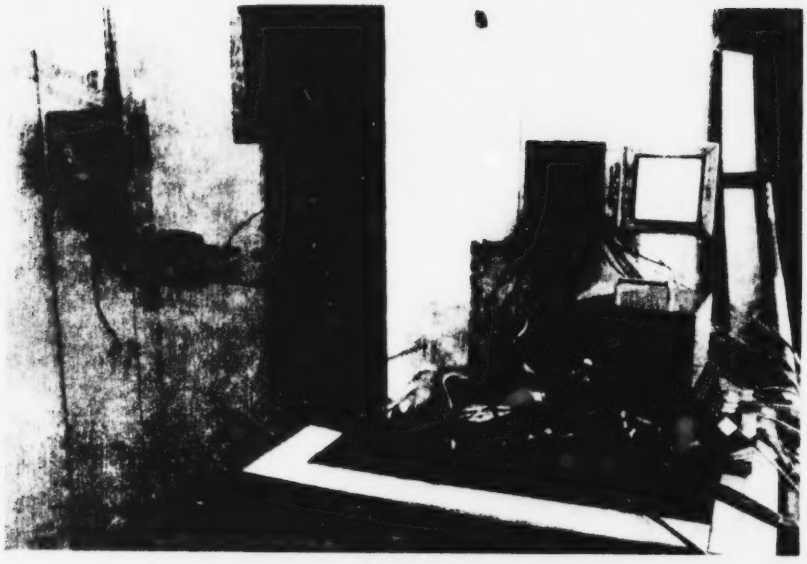

FIGURE 4 TUYAUTERIE À L'EXTÉRIEUR DE LA CHAMBRE FROIDE

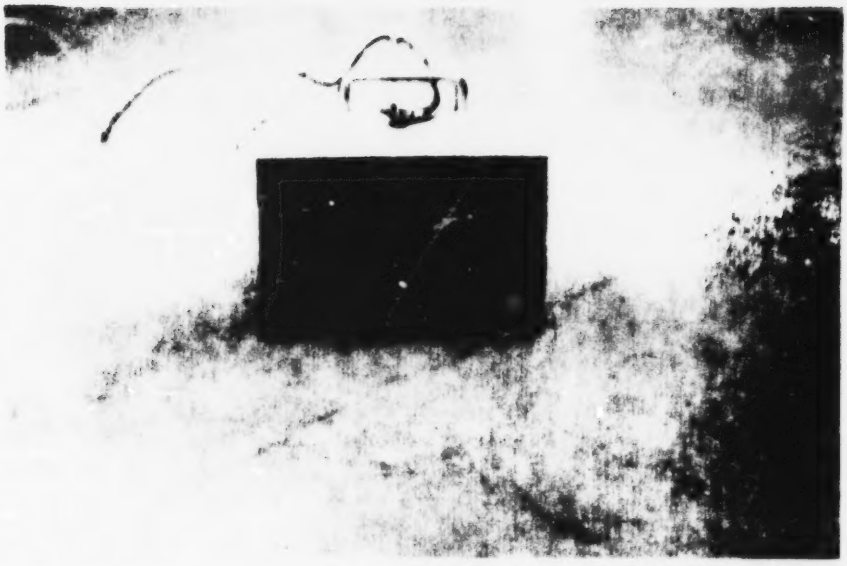

FIGURE 5 DISPOSITIF DE RÉGLAGE DE LA TEMPÉRATURE ET SONDE THERMOMÉTRIQUE

conduites d'écoulement continu, juste avant la sortie de la chambre froide, tandis que la soupage à solénoïde a été installée au point de déversement de la même conduite. Le dispositif était actionné par la plaque de câblage, qu'on avait réglée de façon à ce qu'elle commande l'ouverture de la soupape lorsqu'un signal d'entrée préétabli lui était envoyé par le thermistor. On a réalisé la calibration du dispositif en plongeant la sonde thermométrique dans un bécher rempli d'eau et de glace.

La minuterie est un dispositif qui a pour but de ne permettre l'écoulement continu que de façon intermittente ou encore pendant une période de temps déterminée. Pour les essais en laboratoire, le dispositif était constitué d'une soupape à solénoïde placée à l'extrémité de l'une des conduites d'écoulement continu, à l'endroit où elle sort de la chambre froide, et actionnée par une minuterie qui faisait alterner des périodes égales d'écoulement continu et de non-écoulement. On a utilisé pendant les essais deux types de minuterie: un modèle offert sur le marché et un modèle fabriqué sur commande avec des éléments modulaires standard (voir figure 6).

En théorie, l'intervalle entre les périodes d'écoulement continu ne devrait être fonction que du temps qu'il faut à la température de l'eau stagnante à l'intérieur de la conduite de distribution pour descendre jusqu'à 0 °C, tandis que la période d'écoulement continu ne devrait durer que le temps qu'il faut pour remplacer l'eau froide dans la conduite de distribution par de l'eau plus chaude provenant de la conduite d'alimentation (voir en annexe la méthode de calcul de ces deux périodes). En situation réelle, compte tenu des limites des minuteries peu coûteuses obtenues dans le commerce, il est plus pratique d'établir des périodes égales d'écoulement continu et de non-écoulement. Le débit de l'écoulement continu dans chaque branchement n'en est pas moins réduit de 50 p. 100.

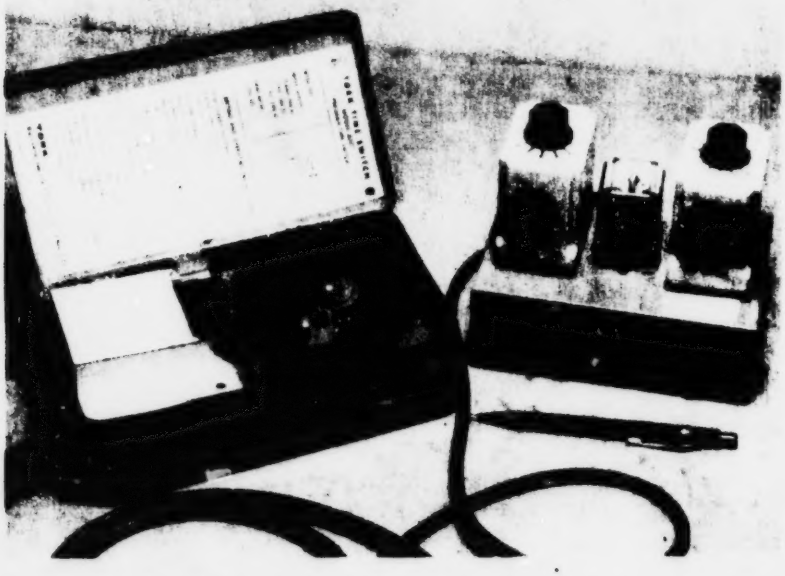

FIGURE 6 LES DEUX MINUTERIES UTILISÉES LORS DES ESSAIS EN LABORATOIRE

Par mesure de précaution, on a réglé la soupage à solénoïde utilisée avec la minuterie de façon à permettre un écoulement continu de l'eau en cas de panne de courant.

Le diaphragme est le dispositif le plus simple qu'on a éprouvé en laboratoire; il s'agit d'une plaque de métal qui peut s'insérer dans un raccord en laiton de 12,7 mm de diamètre intérieur; cette plaque, installée dans une conduite d'écoulement continu, sert à arrêter le débit (voir figure 7). Selon la pression qui s'exerce dans les conduites, il est possible d'ajuster le diamètre de l'orifice percé dans la plaque de façon à régler le débit de l'écoulement continu (voir en annexe les exemples des calculs qui permettent de déterminer le diamètre des orifices).

Quant au dernier dispositif éprouvé, il s'agissait d'un petit réservoir en acier, isolé et relié à une soupape à solénoïde à trois voies elle-même fixée à une des conduites d'écoulement continu, à la sortie de la chambre froide (voir figure 8). Deux détecteurs de niveau réglables étaient placés à l'intérieur du réservoir et reliés à une plaque de câblage. Lorsque le niveau de l'eau atteignait le premier détecteur, la plaque de câblage actionnait l'ouverture de la soupape, ce qui permettait à l'eau de la conduite d'écoulement continu de se déverser dans le réservoir. Lorsque le niveau de l'eau atteignait le deuxième détecteur, la soupape se refermait, ce qui empêchait l'eau de se déverser, tout en permettant au réservoir de se vider. Sur le terrain, la variable critique serait le temps qu'il faut pour que l'eau stagnante gèle dans une conduite de distribution.

FIGURE 7 DIAPHRAGME ET RACCORD EN LAITON

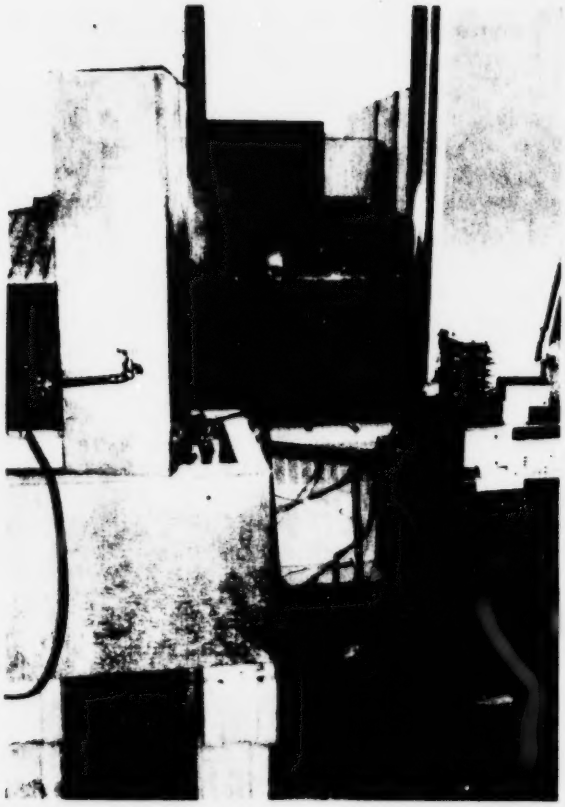

FIGURE 8 RÉSERVOIR DE VIDANGE MUNI DE DÉTECTEURS DE NIVEAU

Après avoir mis les quatre dispositifs simultanément à l'essai, on a modifié l'aménagement de la chambre froide pour éprouver le cinquième dispositif, à savoir le réservoir sous pression. En situation réelle, le dispositif serait constitué d'un grand réservoir sous pression qui, le jour, se remplirait de l'eau de la conduite d'écoulement continu et qui, la nuit, lorsque le réseau fonctionne à basse pression, déverserait cette eau dans la conduite d'alimentation. Le fonctionnement du réservoir serait assuré par un pressostat relié à deux soupapes à solénoïde (voir figure 9). Lorsque le réseau fonctionne à haute pression, la soupape normalement ouverte de l'une des conduites permettrait à l'eau de se déverser dans le réservoir au taux normal d'écoulement continu. Par contre, dès que la pression dans le réservoir atteint un certain niveau préétabli, le pressostat actionne la fermeture de la première soupape et l'ouverture de la seconde, qui est normalement fermée, afin de permettre au réservoir de se vider dans la conduite d'alimentation.

Pour mettre ce dispositif à l'essai, on a dû aménager une installation légèrement différente dans le laboratoire. Comme la pompe de circulation fonctionnait continuellement, on a décidé de permettre au réservoir sous pression de se vider à l'extérieur de la chambre froide, dans le bassin en acier, au lieu de tenter de faire fonctionner le dispositif contre la pompe (voir figure 10).

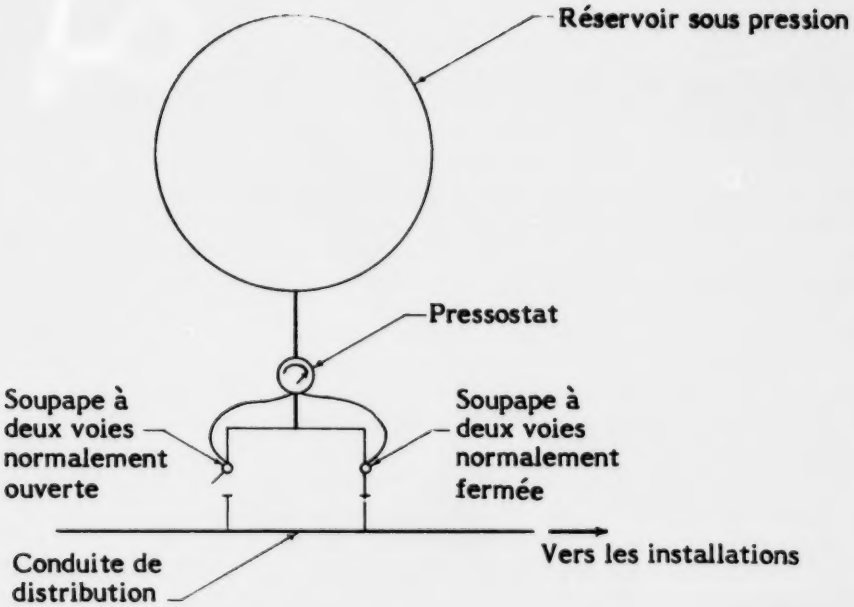

FIGURE 9 RÉSERVOIR SOUS PRESSION (INSTALLATION SUR LE TERRAIN)

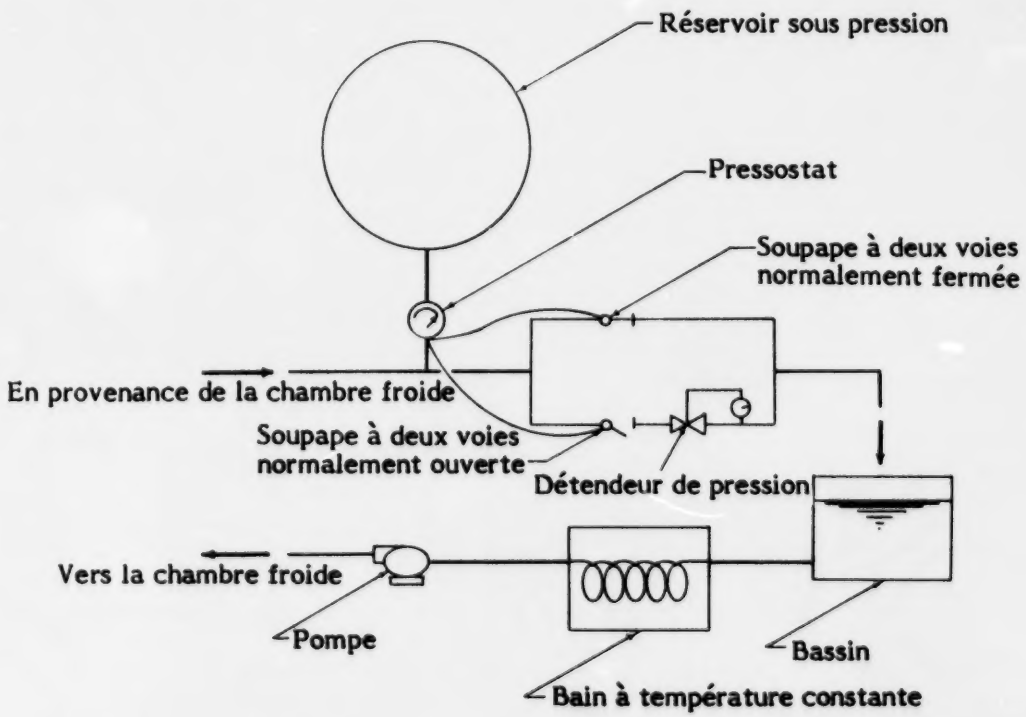

FIGURE 10 RÉSERVOIR SOUS PRESSION (INSTALLATION EN LABORATOIRE)

On a apporté une autre modification à l'aménagement de la chambre froide afin d'obtenir des données sur le rendement de tuyaux de diamètre différent. On a ainsi remplacé un certain nombre de tuyaux de 12,7 mm de diamètre intérieur par des conduites de 19 et de 25,4 mm de diamètre intérieur.

Les données recueillies au cours des essais en laboratoire portaient sur la température, la pression et le débit. Les renseignements sur la température ont été recueillis au moyen de thermocouples de type T (cuivre et constantan). Un thermocouple a été placé dans chaque tuyau, près de son point de déversement, juste avant la sortie de la chambre froide; on s'est servi, pour ce faire, d'un raccord hydraulique en T. Pour assurer l'étanchéité du dispositif, on a recouvert l'extrémité sensible de chaque thermocouple de ruban compressif en caoutchouc butyle auto-fusionnant et on l'a scellé à l'aide d'une couche de calfeutrage au silicone et d'une couche de ciment époxyde. Le procédé a eu pour effet de retarder légèrement le relevé des températures, mais on ne pouvait faire autrement si l'on voulait maintenir l'étanchéité. Lors d'essais ultérieurs, on a remplacé le raccord hydraulique de jonction en T par un tube de 6,4 mm, comportant un raccord mâle de 3,2 mm, à pression et température normales, fileté et soudé directement dans le tuyau.

Les mesures de pression pour chaque tuyau ont été faites à l'aide de transducteurs de pression reliés à chaque conduite par des branchements de cuivre de 6,4 mm et installés, sans être isolés, à l'extérieur de la chambre froide. Chaque transducteur était relié à un démodulateur de porteuse, lequel servait à convertir le courant alternatif en courant continu utilisable.

Les débits ont été mesurés au moyen de compteurs d'eau domestiques modifiés. La modification consistait en ceci: on a ajouté, à l'avant de chaque compteur de débit, un dispositif qui enregistrait les impulsions magnétiques produites par le compteur à chaque tour de cadran. On a utilisé un régulateur de signal pour convertir les impulsions magnétiques en voltage. On a également placé, sur chaque cadran, un compteur à affichage de l'accumulateur de débit mécanique.

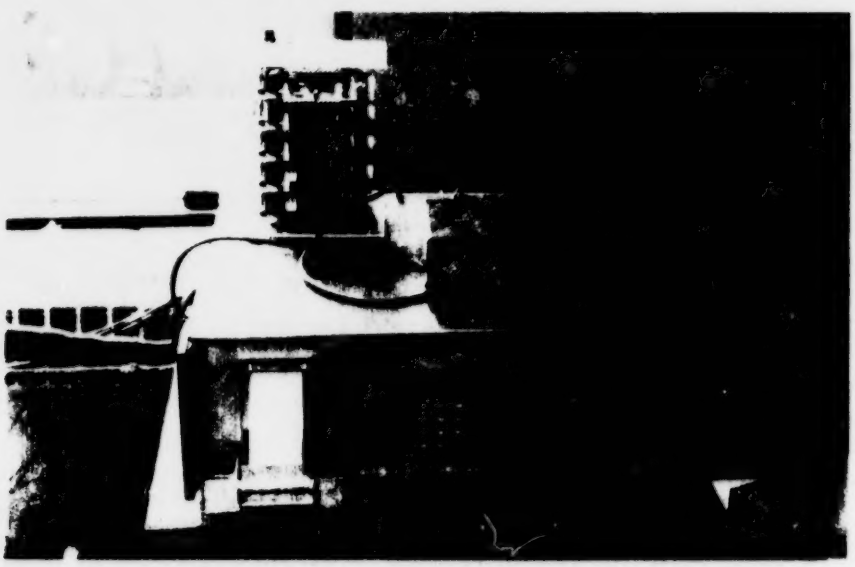

FIGURE 11 ENREGISTREUR AUTOMATIQUE DE DONNÉES FLUKE 2240B

En raison du manque d'espace, les compteurs de débit, installés sur chaque conduite, ont dû être placés à l'intérieur même de la chambre froide. On les a d'abord recouverts d'une couche de 50 mm de fibre de verre isolante. Après avoir procédé à des essais préliminaires, on a cependant décidé d'appliquer sur les compteurs une couche de mousse isolante pour tuyaux avant d'enrouler autour de ceux-ci la fibre de verre isolante. Les compteurs ne risquaient donc pas d'être endommagés par le gel. Chaque appareil était muni d'une plaque de fond remplaçable comportant des conduites de tension préformées qui se seraient ouvertes si l'eau dans le compteur avait gelé et augmenté de volume.

Toutes les données produites par les différents instruments utilisés ont été introduites dans un enregistreur automatique Fluke 2240B, qui peut être programmé de façon à imprimer les relevés à intervalles très courts (1 seconde) ou très longs (jusqu'à 24 heures) (voir figure 11). Les relevés de pression et de débit sont sortis en voltage; on a donc dû les convertir manuellement pour obtenir leurs unités types. L'enregistreur possédait cependant une caractéristique spéciale grâce à laquelle on pouvait obtenir les températures directement en degrés Celsius. On a calibré les transducteurs de pression en utilisant un manomètre comme étalon; les courbes d'étalonnage des compteurs de débit ont été mises au point grâce à une série d'essais minutés, réalisés sur chaque compteur.

3 ESSAIS EN LABORATOIRE: MÉTHODES ET RÉSULTATS

Après avoir éprouvé certaines difficultés au début à obtenir le matériel, à construire un réseau de recirculation étanche, ainsi qu'à vérifier et à calibrer le système, on a commencé en octobre 1980 à évaluer diverses solutions en laboratoire. On s'est fixé pour ces essais les objectifs immédiats suivants:

a) déterminer lesquels des cinq dispositifs feraient défaut dans des conditions de fonctionnement simulé intensif;
b) déterminer les économies nettes d'eau réalisées en utilisant l'un ou l'autre des nouveaux dispositifs plutôt qu'un dispositif d'écoulement continu classique.

Lors des essais, on a poussé au maximum les commandes de réfrigération de la chambre froide, afin de s'assurer que les résultats des essais en laboratoire pourraient être appliqués en toute sécurité à une situation réelle. On a ainsi maintenu la température à l'intérieur de la chambre froide à -25 °C, mais il est peu probable que la température du sol, à la profondeur à laquelle sont habituellement enterrées les canalisations, atteigne jamais ce chiffre.

Chaque cycle d'essais a débuté par la mise en marche de la pompe qui actionnait le réseau de recirculation de l'eau et par l'abaissement simultané de la température dans la chambre froide. On a programmé la sortie sur imprimante des relevés de l'enregistreur automatique de données à toutes les cinq minutes, au cours de la première ou des deux premières heures d'essais, et à toutes les 10, 15 ou 20 minutes par la suite.

3.1 Essai nº 1

L'essai nº 1 a porté sur les dispositifs suivants: le dispositif de réglage de la température, la minuterie en vente dans le commerce, le réservoir de vidange et le diaphragme. Les commandes de température de la chambre froide ont été réglées à -30 °C.

Après la stabilisation de la température de la chambre froide, il est devenu évident que le réseau de recirculation ne fonctionnait pas tout à fait comme nous le désirions. Ainsi, l'ouverture et la fermeture des soupapes dans les dispositifs d'écoulement intermittent provoquait des fluctuations du débit et de la pression dans toutes les autres conduites du réseau. Le fonctionnement cyclique de l'éjecteur Jacuzzi de 0,373 kW produisait également des fluctuations du débit et de la pression. Nous avons aussi fait face à un autre problème: la fermeture de la soupape à solénoïde à trois voies, dans le réservoir de vidange, se faisait si brusquement qu'elle donnait lieu à des coups de bélier, lesquels provoquaient des vibrations dans les conduites. Ces problèmes, qui avaient sans aucun doute un effet sur le rendement de l'ensemble du réseau, ont cependant été jugés tolérables.

L'un des points faibles les plus évidents de notre système était le compresseur de la chambre froide qui même réglé à -40 °C, était incapable d'abaisser la température ambiante au-dessous de -25 °C ou -26 °C. Lors de l'essai nº 1, la température ambiante s'est stabilisée à -19 °C, cinq heures après le réglage du compresseur à -30 °C; au bout de 73 heures, on a donc décidé de pousser les commandes au maximum. C'est alors qu'on a obtenu une température ambiante de -25 °C à -26 °C.

Lors de l'essai nº 1, c'est le dispositif de réglage de la température qui a fait défaut le premier. On avait fixé la température de déclenchement de la sonde thermo-

métrique à environ 0,5 °C, mais la soupape à solénoïde n'a pas fonctionné avant que l'eau ne gèle dans la conduite.

C'est le réservoir de vidange qui a fait défaut en deuxième lieu. Lors de l'essai, on avait réglé les détecteurs de niveau de façon à ce que le réservoir fonctionne avec un débit de 2,8 litres, soit plus de trois fois le volume d'eau contenu dans la conduite. La durée de la vidange était de cinq minutes et le réservoir se remplissait en huit secondes entre chaque vidange. Il est devenu évident que le réservoir tomberait en raison des coups de bélier qui se faisaient de plus en plus violents, ce qui indiquait que la conduite était de plus en plus obstruée par la glace. Le dispositif est tombé en panne environ 103 heures après le début de l'essai, 31 heures après la chute de la température à -25 °C.

De tous les dispositifs qui ont gelé, c'est la minuterie qui a tenu le coup le plus longtemps. La minuterie utilisée pour les essais était la plus sensible qu'on pouvait trouver dans le commerce. On la réglait en enfonçant des touches de métal sur un cadran dont le cycle était de 24 heures; chaque touche représentait une période de 15 minutes. La minuterie a fait défaut après 221 heures de fonctionnement. C'est le temps de plus en plus long qu'il fallait au dispositif pour obtenir le débit normal d'écoulement continu de l'eau après l'ouverture de la soupape à solénoïde qui indiquait la progression du gel dans la conduite.

Seul le diaphragme n'avait pas encore fait défaut lorsqu'on a mis un terme à l'essai après 224 heures. C'est aussi la seule installation dans laquelle le débit et la pression ne se sont pas écartés de façon significative de leur moyenne de 1,8 litre/minute et de 415 kPa. On trouvera un résumé schématisé des résultats de l'essai n° 1 aux figures 12 et 13 ainsi qu'au tableau 4.

Après cet essai, on a procédé à la décongélation du réseau de recirculation et on a effectué les réparations nécessaires. Il a fallu beaucoup de temps pour déceler les fuites, enlever l'isolation des tuyaux, remplacer les raccords et les sections de tuyaux brisés.

Au cours des essais en laboratoire, les bris de tuyaux ne se sont produits qu'au niveau des coudes et autres raccords de tuyauterie (voir figure 14). Nous n'en avons pas moins été obligés de remplacer au complet des sections droites de tuyau; en effet, pour enlever un raccord fendu, il fallait couper une partie de section droite; or, le tuyau n'était parfois plus assez long pour pouvoir être fixé aux nouveaux raccords. Les fuites qui se sont produites aux endroits où les tuyaux gelés étaient branchés à la tubulure ont également posé un problème. Elles ont été particulièrement difficiles à réparer parce qu'il était impossible de vidanger toute l'eau contenue à l'intérieur de la tubulure.

Le soudage de pièces aux endroits resserrés ou peu accessibles ainsi que le maintien des joints d'étanchéité des thermocouples installés dans les conduites ont eux aussi posé des problèmes.

3.2 Essai n° 2

Si l'on fait exception des modifications qui ont été apportées aux dispositifs qui avaient fait défaut, l'essai n° 2 constituait une répétition de l'essai n° 1. On a ainsi recalibré la plaque de câblage du dispositif de réglage de la température de façon qu'il déclenche l'ouverture de la soupape à solénoïde lorsque sa sonde thermométrique atteint 1 °C. On a également réglé les détecteurs de niveau du réservoir de vidange de façon que les cycles de vidange et de remplissage durent respectivement 4,75 minutes et 7 secondes. On a conservé les mêmes temps que lors de l'essai n° 1.

On trouvera les résultats schématisés de l'essai n° 2 aux figures 15 et 16 ainsi qu'au tableau 5. On a réglé la température de la chambre froide au minimum pour toute la durée de l'essai. C'est encore le dispositif de réglage de la température qui a fait défaut le

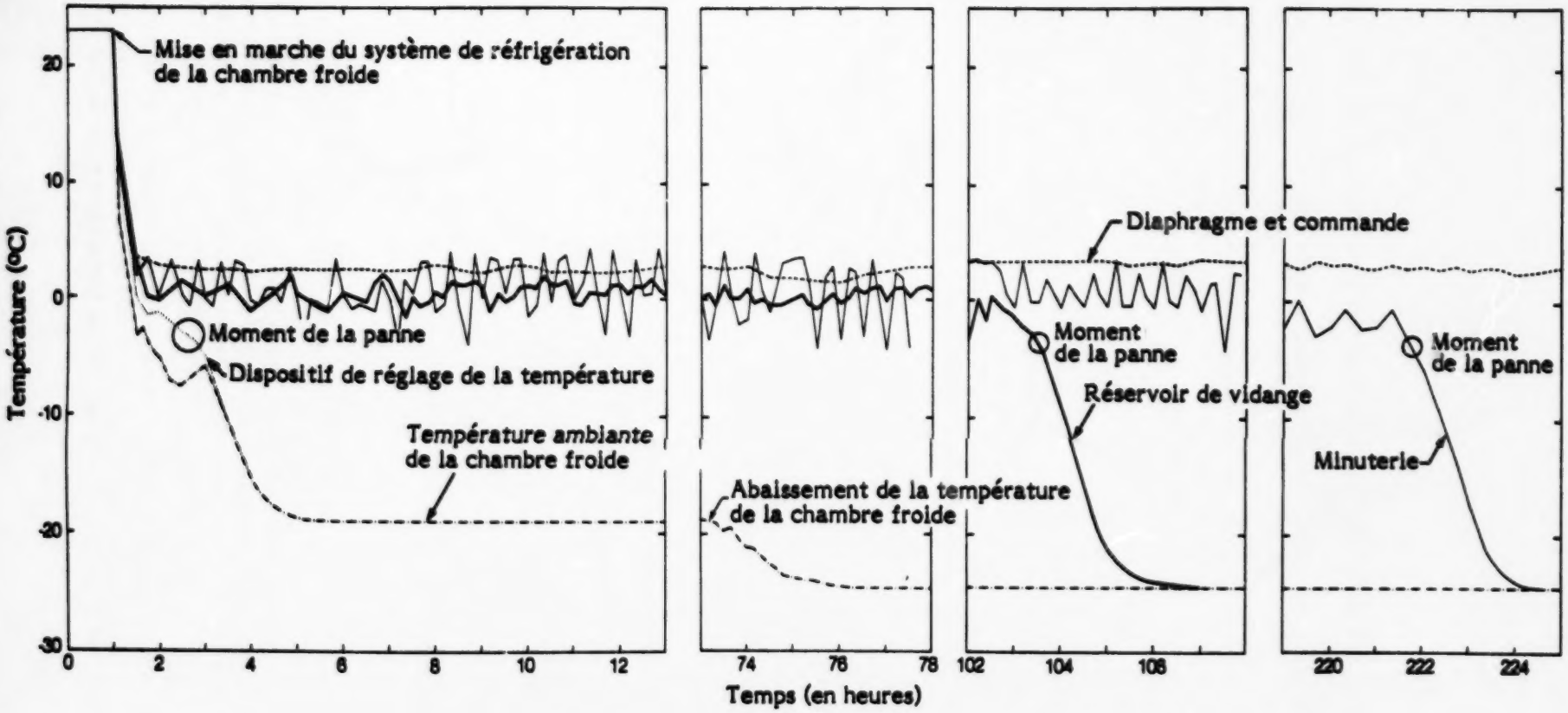

FIGURE 12 GRAPHIQUE DE LA TEMPÉRATURE LORS DE L'ESSAI Nº 1

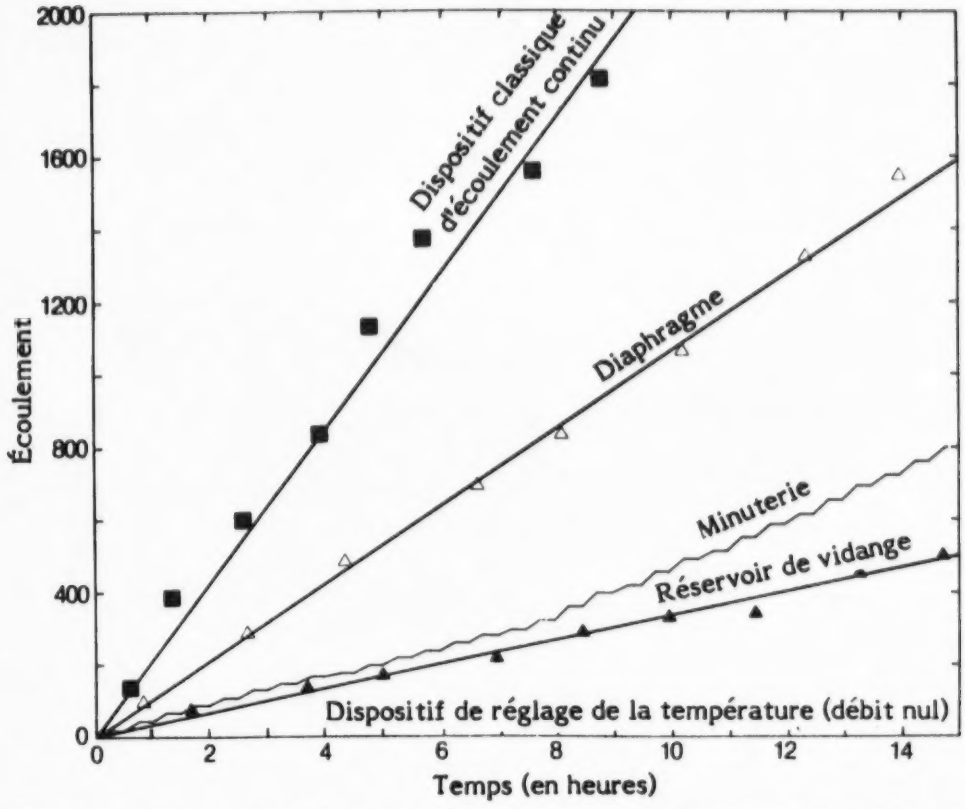

FIGURE 13 TAUX DE CONSOMMATION D'EAU AU COURS DE L'ESSAI N° 1

Tableau 4 Données sur le gaspillage de l'eau obtenues lors de l'essai n° 1

Dispositif	Écoulement continu de l'eau	
	Taux net (en litres/heure)	Total lors de l'essai (en litres)
Réservoir de vidange	34	3 500 litres (jusqu'à la panne)
Diaphragme	106	23 400 litres (après 224 heures)
Dispositif de réglage de la température	0	0 litre (jusqu'à la panne)
Minuterie	46	13 100 litres (jusqu'à la panne)
Dispositif classique d'écoulement continu	212	47 600 litres (après 224 heures)

FIGURE 14 BRIS TYPIQUE D'UN TUYAU AU COUDE

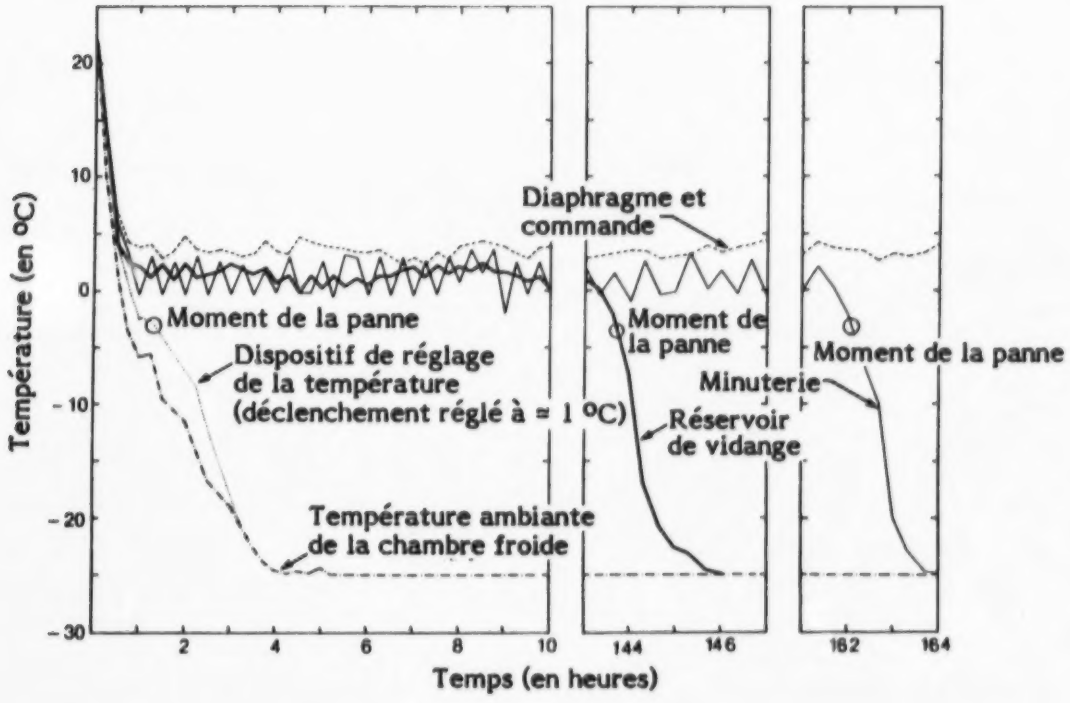

FIGURE 15 GRAPHIQUE DE LA TEMPÉRATURE LORS DE L'ESSAI Nº 2

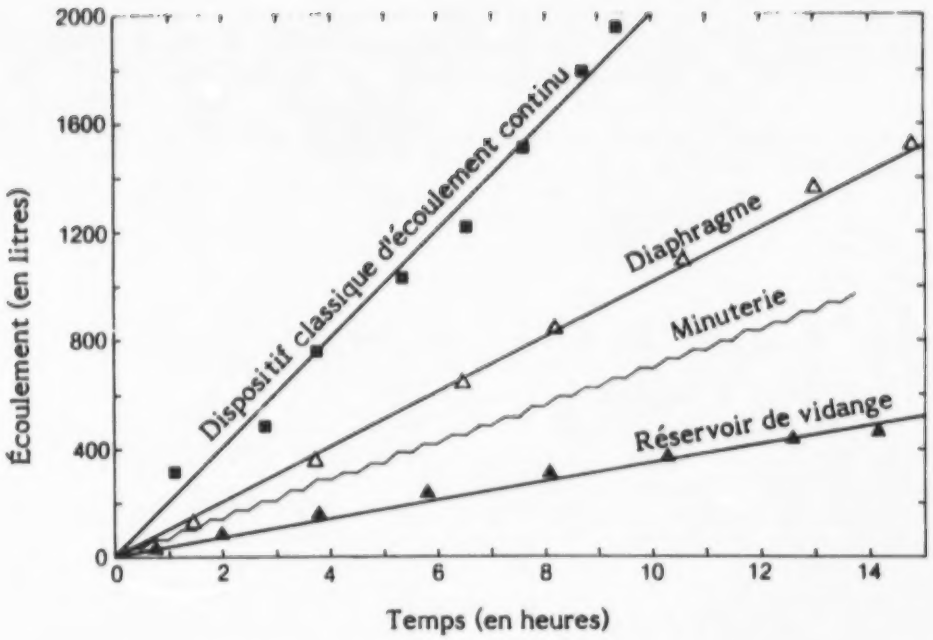

FIGURE 16 TAUX DE CONSOMMATION D'EAU AU COURS DE L'ESSAI Nº 2

Tableau 5 Données sur le gaspillage de l'eau obtenues lors de l'essai nº 2

Dispositif	Écoulement continu de l'eau	
	Taux net (en litres/heure)	Total lors de l'essai (en litres)
Réservoir de vidange	35	5 000 litres (jusqu'à la panne)
Diaphragme	106	17 400 litres (après 164 heures)
Dispositif de réglage de la température	0	0 litre (jusqu'à la panne)
Minuterie	69	11 250 litres (jusqu'à la panne)
Dispositif classique d'écoulement continu	203	33 300 litres (après 104 heures)

premier. La soupape à solénoïde ne s'est pas ouverte avant que le tuyau ne soit complètement obstrué par la glace. Le réservoir de vidange est de nouveau tombé en panne, cette fois 143 heures, tandis que la minuterie a fonctionné pendant 162 heures. On a observé les même effets que lors de l'essai nº 1, à savoir les coups de bélier de plus en plus violents dans le réservoir de vidange et le temps de plus en plus long qu'il fallait au dispositif de minuterie pour obtenir le débit normal d'écoulement continu de l'eau. Aucune différence perceptible n'a été notée dans le fonctionnement du diaphragme au cours de l'essai nº 2, auquel on a mis un terme après 164 heures.

3.3 Essai nº 3

On a encore apporté d'autres modifications aux dispositifs en vue de l'essai nº 3. Le dispositif de réglage de la température a ainsi été recalibré pour se déclencher à 2 ºC. Le cycle du réservoir de vidange a été rajusté à 4,5 minutes pour la vidange et à 6 secondes pour le remplissage. Enfin, on a remplacé la minuterie en vente dans le commerce par un dispositif fabriqué spécialement au moyen de composantes modulaires. La minuterie ainsi obtenue comportait une commande réglable permettant de déterminer séparément (0-5 minutes) les périodes d'écoulement et de non-écoulement. Pour les besoins de l'essai, les deux périodes ont été fixées à trois minutes.

On trouvera un résumé schématisé des résultats de l'essai nº 3 aux figures 17 et 18 ainsi qu'au tableau 6. Le dispositif de réglage de la température a déclenché l'ouverture de la soupape à solénoïde après 25 minutes de fonctionnement, mais il n'a fait évacuer que l'eau qui se trouvait dans le voisinage immmédiat du thermistor; en effet, lorsque la soupape s'est ouverte, la glace obstruait déjà certaines sections de la conduite.

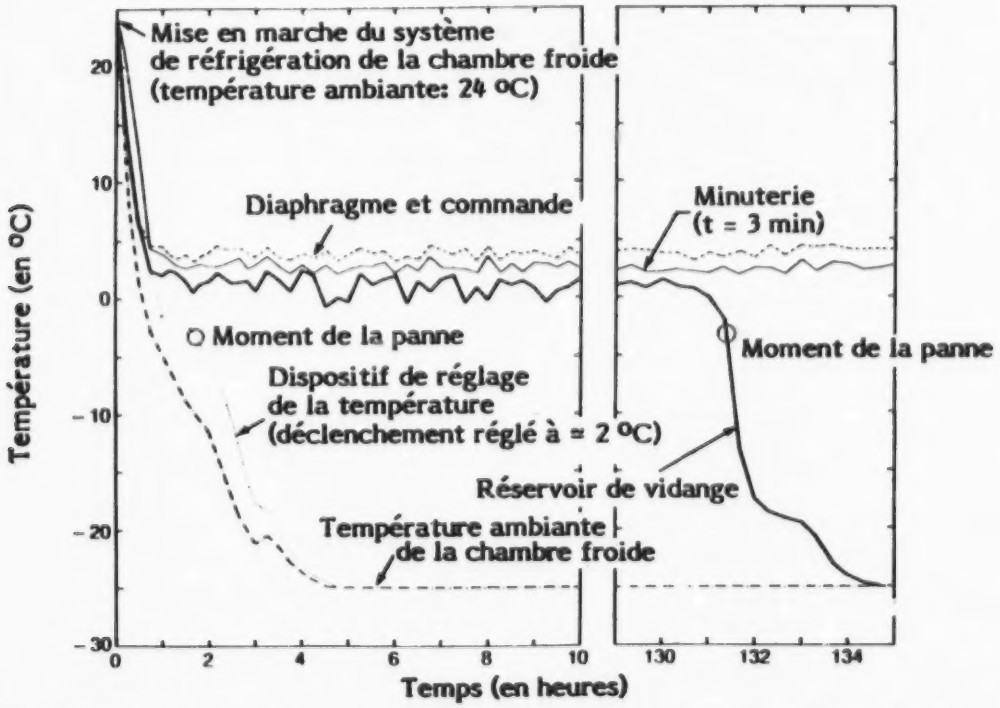

FIGURE 17 GRAPHIQUE DE LA TEMPÉRATURE LORS DE L'ESSAI Nº 3

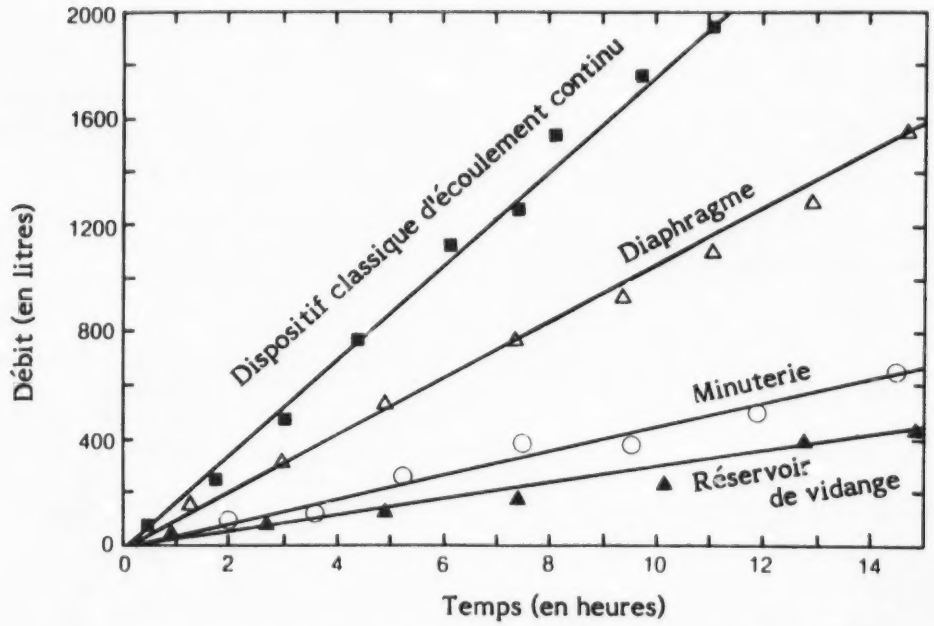

FIGURE 18 TAUX DE CONSOMMATION D'EAU AU COURS DE L'ESSAI Nº 3

Tableau 6 Données sur le gaspillage de l'eau obtenues lors de l'essai nº 3

Dispositif	Écoulement continu de l'eau	
	Taux net (en litres/heure)	Total lors de l'essai (en litres)
Réservoir de vidange	30	3 950 litres (jusqu'à la panne)
Diaphragme	106	17 700 litres (après 167 heures)
Dispositif de réglage de la température	0	0 litre (jusqu'à la panne)
Minuterie	45	7 500 litres (après 167 heures)
Dispositif classique d'écoulement continu	177	29 600 litres (après 167 heures)

Le réservoir de vidange a lui aussi fait défaut, cette fois après 131 heures de fonctionnement. On a observé la même augmentation de l'intensité des coups de bélier que lors des deux essais précédents.

La nouvelle minuterie n'est pas tombée en panne lors de l'essai nº 3. L'écoulement continu de l'eau est parvenu à son débit normal après l'ouverture de la soupage à solénoïde. Les températures observées dans la conduite n'ont pas non plus descendu au-dessous de 2 ºC.

Le diaphragme a lui aussi tenu le coup pendant toute la durée de l'essai nº 3, auquel on a mis un terme après 167 heures.

3.4 Essai nº 4

D'autres ajustements ont été faits en vue de l'essai nº 4. On a ainsi fixé les temps de vidange et de remplissage du réservoir de vidange à 4 minutes et à 5 secondes respectivement. On a recalibré le dispositif de réglage de la température pour qu'il se déclenche à 3 ºC. Enfin, pour tenter de réduire le débit d'écoulement continu du diaphragme sans avoir à réduire le diamètre de l'orifice, on a installé un détendeur de pression réglable dans la conduite de 12,7 mm, juste avant le diaphragme (voir figure 19).

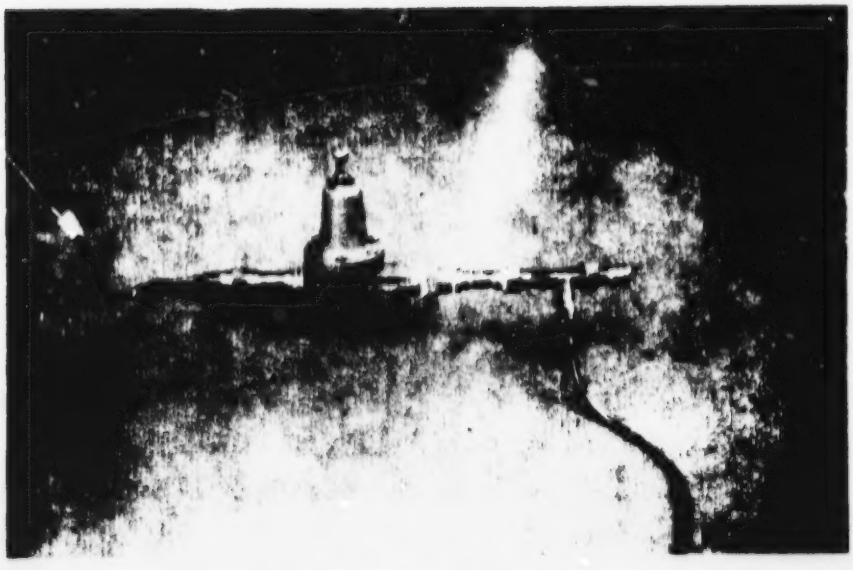

FIGURE 19 INSTALLATION DU DÉTENDEUR DE PRESSION ET DU DIAPHRAGME

On trouvera un résumé schématisé des résultats de l'essai nº 4 aux figures 20 et 21 ainsi qu'au tableau 7. Tout comme lors de l'essai précédent, la minuterie et le diaphragme ont fonctionné pendant toute la durée de l'essai. Grâce au détendeur de pression, on a pu réduire encore plus le débit de l'écoulement continu du diaphragme. Le dispositif de réglage de la température a également fonctionné pendant toute la durée de l'essai; l'ouverture de la soupape à solénoïde a été déclenchée après 20 minutes et le débit normal de l'écoulement continu de l'eau s'est par la suite maintenu sans problème. Quant au réservoir de vidange, il a de nouveau fait défaut, cette fois après 153 heures de fonctionnement.

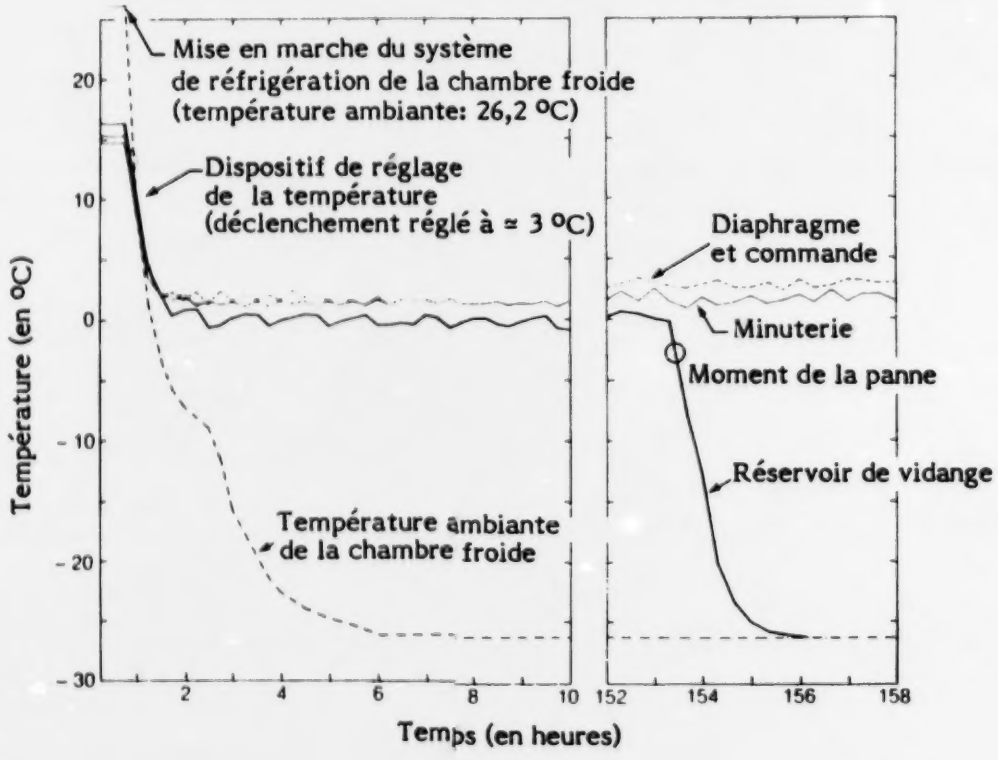

FIGURE 20 GRAPHIQUE DE LA TEMPÉRATURE LORS DE L'ESSAI Nº 4

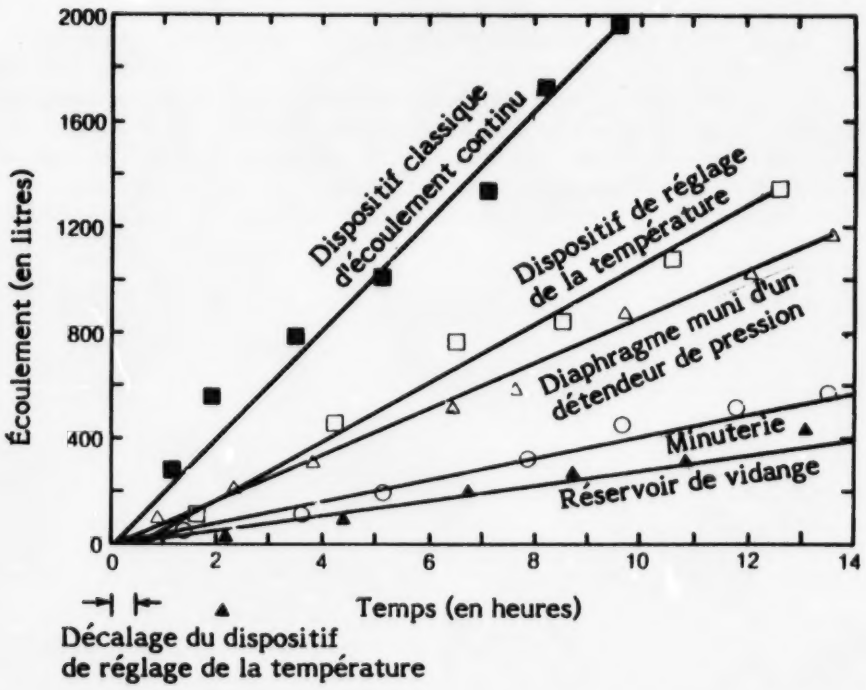

FIGURE 21 TAUX DE CONSOMMATION D'EAU AU COURS DE L'ESSAI N° 4

Tableau 7 Données sur le gaspillage de l'eau obtenues lors de l'essai n° 4

Dispositif	Écoulement continu de l'eau	
	Taux net (en litres/heure)	Total lors de l'essai (en litres)
Réservoir de vidange	27	4 300 litres (jusqu'à la panne)
Diaphragme	87	14 600 litres (après 168 heures)
Dispositif de réglage de la température	111	18 650 litres (après 168 heures)
Minuterie	41	6 900 litres (après 168 heures)
Dispositif classique d'écoulement continu	197	33 100 litres (après 168 heures)

3.5 Essai nº 5

Après l'essai nº 4, on a remplacé deux des tuyaux du réseau de recirculation par un tuyau de 25,4 mm de diamètre intérieur et deux autres tuyaux par un tuyau de 19 mm de diamètre intérieur. On a enlevé les quatre dispositifs qu'on venait de mettre à l'essai et on a remplacé l'éjecteur par une pompe centrifuge plus puissante. On a alors installé le cinquième dispositif, comme l'illustre la figure 22. Il s'agissait d'un grand réservoir en acier, sous pression et muni d'un sac d'air interne. On a installé sur la conduite de cuivre qui amenait l'eau au réservoir, un pressostat qu'on a relié à deux soupapes à solénoïde à deux voies, l'une normalement ouverte et l'autre normalement fermée. On a également placé sur la conduite, après la soupape normalement ouverte, un détendeur de pression réglé à 100 kPa.

Lors de l'essai nº 5, le pressostat a été réglé de façon à fonctionner selon un cycle basse pression-haute pression de 100 à 275 kPa. En raison du diamètre plus grand du tuyau, la pompe de recirculation ne pouvait en effet supporter une pression supérieure à 275 kPa dans les conduites.

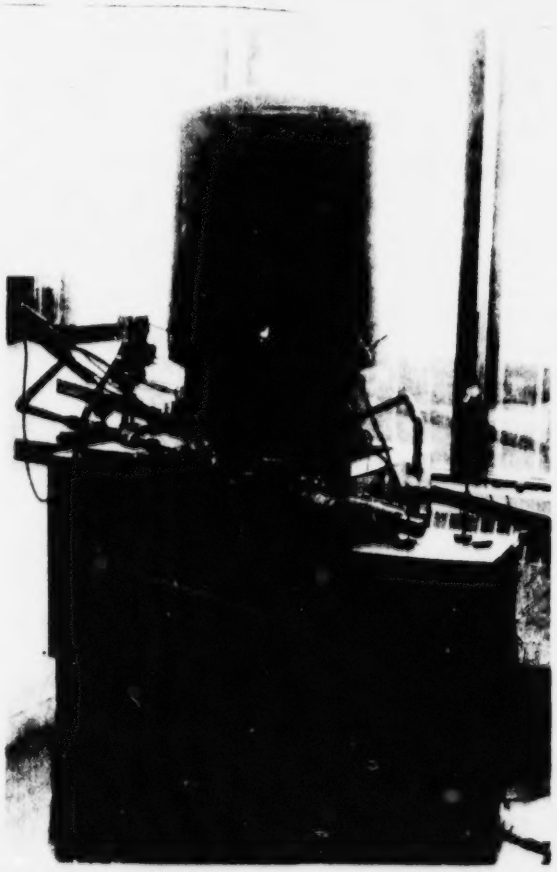

FIGURE 22 INSTALLATION DU RÉSERVOIR SOUS PRESSION

Le réservoir sous pression fonctionnait comme suit: après la mise en marche du système, l'eau se mettait à recirculer dans le réseau, en passant notamment par la soupape à solénoïde normalement ouverte et par le détendeur de pression. Une partie de cette eau était cependant détournée vers le réservoir, jusqu'à ce que la pression y atteigne 275 kPa; le pressostat déclenchait alors l'ouverture de la soupape normalement fermée et la fermeture de la soupape normalement ouverte. L'eau du réservoir était évacuée dans le réseau jusqu'à ce que la pression retombe à 100 kPa. Le cycle recommençait ensuite.

Le dispositif a été mis à l'essai pendant environ 240 heures; rappelons qu'on utilisait une conduite de 25,4 mm de diamètre intérieur. Il n'y a pas eu de panne pendant cette période. Le remplissage durait environ 13 minutes et la vidange, deux minutes. Le prélèvement effectué à chaque cycle équivalait à 64 litres d'eau. On trouvera à la figure 23 un graphique des températures lors de l'essai nº 5.

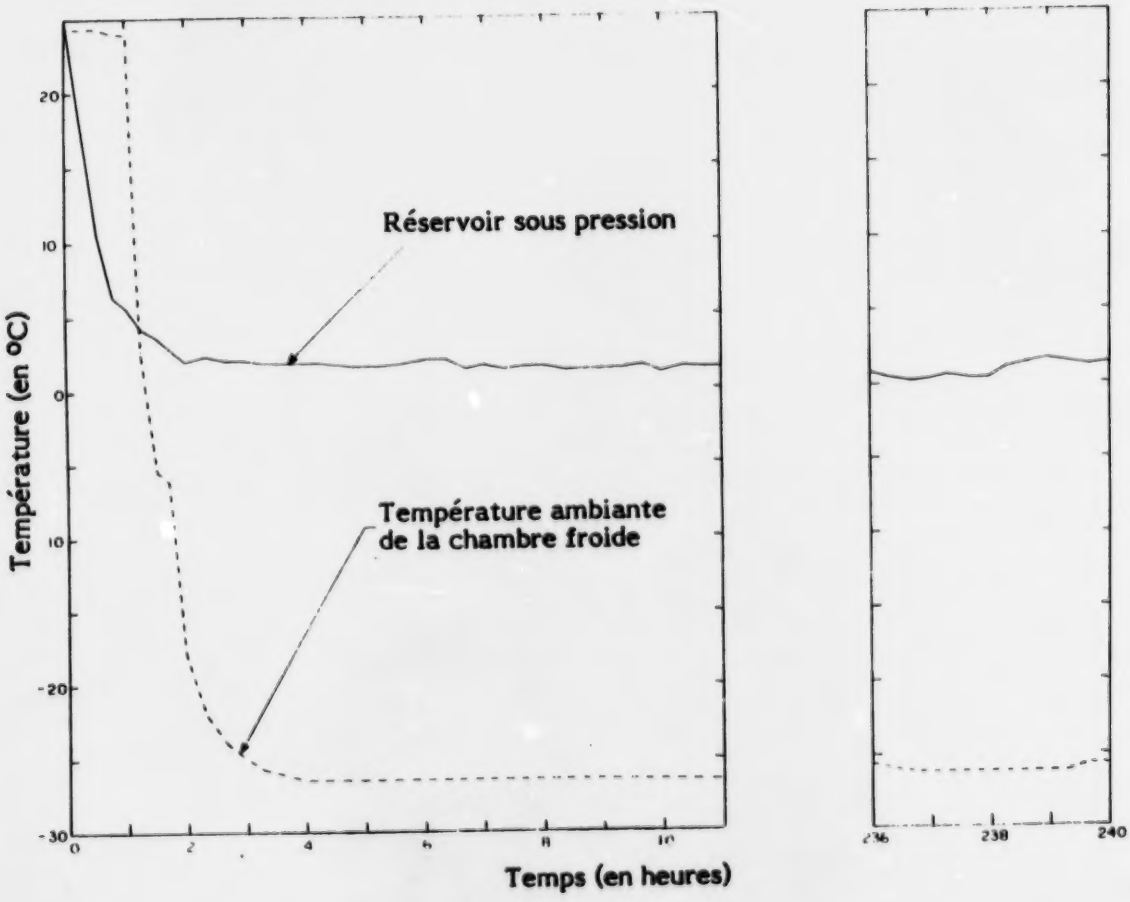

FIGURE 23 GRAPHIQUE DE LA TEMPÉRATURE LORS DE L'ESSAI Nº 5

3.6 Essai nº 6

Pour l'essai nº 6, on a remplacé le tuyau de 25,4 mm de diamètre intérieur par une conduite de 19 mm. Le dispositif a de nouveau été éprouvé pendant 240 heures, sans qu'on puisse observer de défaillance. Le remplissage et la vidange du réservoir duraient respectivement 14 et 2 1/4 minutes. On trouvera à la figure 24 un graphique de la température lors de l'essai nº 6.

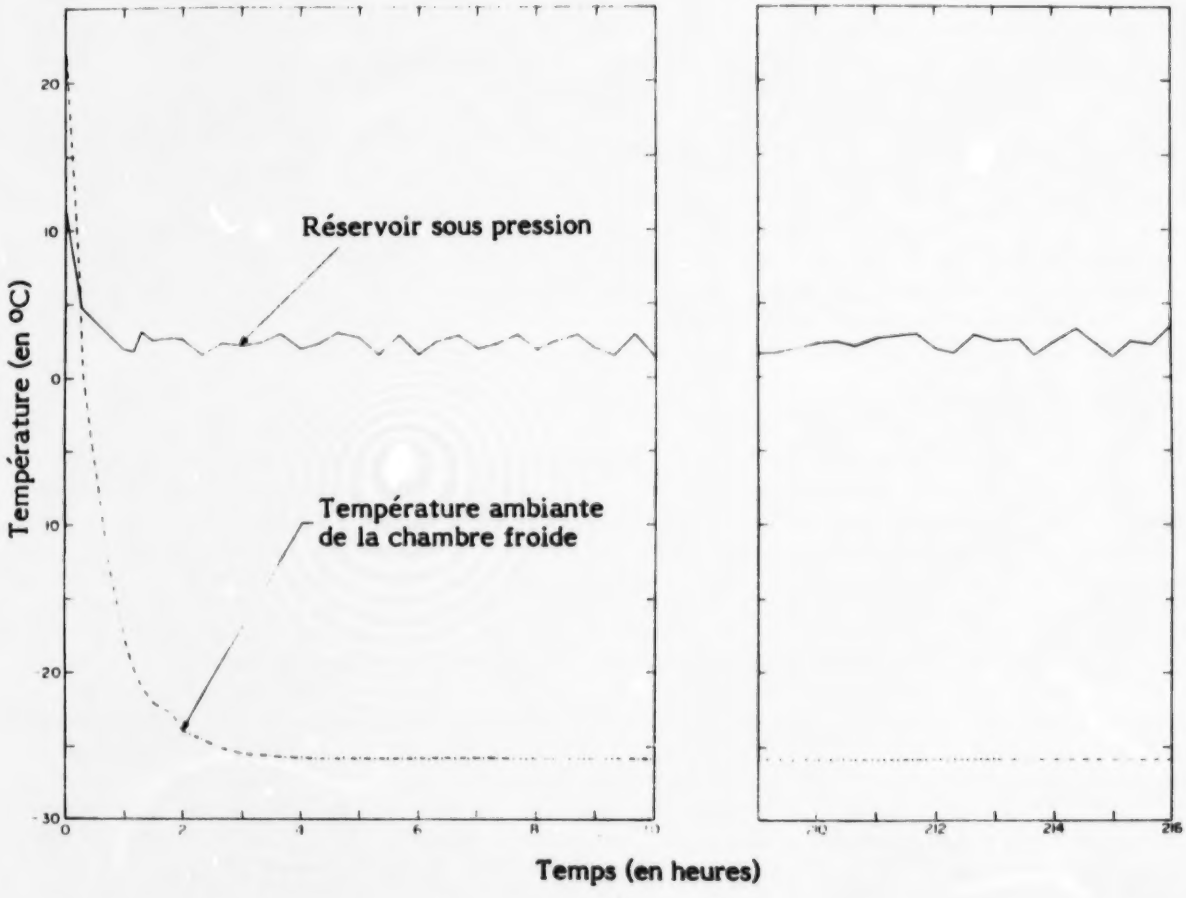

FIGURE 24 GRAPHIQUE DE LA TEMPÉRATURE LORS DE L'ESSAI Nº 6

4 DISCUSSION

4.1 Dispositif de réglage de la température

Le dispositif de réglage de la température a été mis à l'essai quatre fois; il est tombé en panne trois fois sur quatre. La soupape à solénoïde ne s'est ouverte que deux fois, soit lorsqu'on a réglé la température de déclenchement à 2 °C et à 3 °C; l'écoulement continu de l'eau ne s'est produit qu'à la température de 3 °C. Le dispositif a fait défaut parce que, l'eau étant en état de stagnation dans la conduite, une quantité de glace suffisante pour obstruer complètement le tuyau s'est formée à l'intérieur de la chambre froide, avant que la température de l'eau près de la sonde thermométrique ne baisse assez pour déclencher l'ouverture de la soupape. Dans le seul essai au cours duquel la soupape s'est ouverte à temps pour permettre l'écoulement continu de l'eau, le débit s'est maintenu sans interruption pendant toute la durée de l'essai.

Le principal problème que pose ce dispositif semble être de trouver le point de la conduite de distribution le plus propice à l'installation de la sonde thermométrique. Si on pouvait déterminer avec certitude l'endroit le plus froid de la conduite et y placer le thermistor, il suffirait sans doute, pour assurer une protection appropriée contre le gel, de régler la température de déclenchement de la soupape à un demi-degré Celsius ou moins du point de congélation. Par contre, dans le cas d'une sonde thermométrique installée sur une conduite à l'extérieur d'un bâtiment, il est impossible de déterminer l'endroit le plus froid; dans un sous-sol, il faudrait élever la température de déclenchement pour assurer une protection appropriée contre le gel.

S'il fallait, pour déclencher l'ouverture de la soupape à solénoïde, que la température de déclenchement soit presque aussi élevée que la température de l'eau à la sortie de la conduite de distribution, l'écoulement continu, une fois commencé, se poursuivrait sans interruption, ce qui réduirait le dispositif, pendant l'hiver, à un simple dispositif classique d'écoulement continu, comme l'a démontré l'essai n° 4.

4.2 Minuterie

La défaillance de la minuterie, au cours des deux premiers essais, était due aux limites de réglage du modèle commercial utilisé. Dans les conditions de déroulement de l'essai, une période de stagnation de l'eau de 15 minutes était suffisante pour permettre à la glace de se former dans la conduite. Le temps relativement long qu'il fallait au dispositif pour atteindre le débit normal d'écoulement continu de l'eau, après l'ouverture de la soupape à solénoïde, confirme d'ailleurs cette assertion. On n'a cependant pas relevé la présence de glace fondante ou de particule de glace à la sortie de la conduite, ce qui est probablement dû à l'étroitesse de l'orifice du dispositif d'écoulement continu.

Par contre, avec la minuterie spécialement conçue, le refroidissement de la conduite pendant la période de stagnation n'a jamais été assez prononcé pour permettre à l'eau de se cristalliser en glace dendritique. En effet, l'écoulement continu est parvenu à son débit normal tout de suite après l'ouverture de la soupape, lors des essais nos 3 et 4.

Si on veut obtenir un rendement optimal, la période de stagnation doit durer assez longtemps pour que la température à un point critique à l'intérieur du tuyau tombe juste au-dessus du point de congélation. La période d'écoulement devrait alors suffire tout juste à remplacer toute l'eau de la conduite de distribution par de l'eau à une température plus élevée provenant de la conduite d'alimentation. À l'aide d'une minuterie réglable comme celle dont on s'est servi au cours des essais nos 3 et 4, il est possible de régler la soupape à solénoïde pour qu'elle fonctionne selon un tel cycle.

4.3 Diaphragme

Pour les trois dispositifs qui fonctionnent selon un écoulement intermittent, la période critique survient lorsque l'eau stagne dans la conduite. C'est au cours de cette période que la perte nette de chaleur est la plus importante, puisqu'il n'y a aucun apport de chaleur venant de l'extérieur. Dans le cas du diaphragme cependant, le débit d'eau et, donc, l'apport de chaleur dans la conduite de distribution sont continus; il suffit que ce débit soit assez élevé pour empêcher la température de descendre au-dessous du point de congélation à un point critique de la conduite. On peut contrôler le débit dans une conduite en utilisant l'équation de l'orifice (voir annexe) et en faisant varier deux facteurs; le premier est le diamètre de l'orifice et le second la pression de l'eau dans la conduite avant qu'elle n'atteigne l'orifice. On peut toujours ajouter un troisième facteur, le diamètre de la conduite, mais il est plus compliqué de le faire varier. On trouvera en annexe les variations du débit pour différents diamètres d'orifice et différentes pressions dans les conduites.

Sur le terrain, on réglerait le débit de l'écoulement continu à un taux préétabli (par exemple, 1,5 litre/minute) sans recourir au propriétaire; on utiliserait pour ce faire un robinet-vanne, que le propriétaire n'aurait qu'à ouvrir complètement chaque hiver et à fermer chaque été. Dans les régions où la présence de sable dans les conduites pose un problème, il suffirait d'augmenter le diamètre de l'orifice et d'installer en amont un détendeur de pression préréglé. On empêcherait ainsi la conduite d'écoulement continu de s'obstruer et on n'aurait qu'à nettoyer périodiquement les tamis du détendeur de pression. L'utilisation d'un détendeur de pression permettrait en outre d'économiser un volume plus considérable d'eau, puisque le diaphragme, s'il est utilisé seul, doit comporter un orifice assez large pour assurer un écoulement minimal lors des périodes de basse pression; il s'ensuit que, lors des périodes de haute pression, le débit s'écoulant par l'orifice serait beaucoup plus élevé qu'il n'est nécessaire.

4.4 Réservoir

Le réservoir a fait défaut au cours des quatre essais qui ont été effectués dans les conditions presque stables de température qui régnaient dans la chambre froide; la défaillance est due aux périodes de stagnation trop longues, qui ont permis à l'eau de se cristalliser en glace dendritique. Comme l'ont démontré les coups de bélier de plus en plus violents qui se produisaient chaque fois que l'écoulement était interrompu, les périodes d'écoulement ne se prolongeaient pas assez longtemps pour libérer complètement le tuyau de la glace, laquelle a fini par s'accumuler et empêcher tout écoulement de l'eau.

Il est essentiel dans ce type de dispositif qu'après une période de stagnation, toute l'eau froide dans la conduite soit remplacée par de l'eau plus chaude à mesure que le réservoir se remplit. Si de la glace a commencé à se former dans la conduite, l'apport total de chaleur correspondant au remplacement de l'eau doit être suffisant pour faire fondre la glace et empêcher toute nouvelle cristallisation pendant la période de stagnation suivante. En outre, la pression dans la conduite d'alimentation doit être assez forte pour assurer la reprise de l'écoulement dès l'ouverture de la soupape, en particulier si un refroidissement prononcé a permis la formation de glace annulaire.

La période pendant laquelle le réservoir se vidange et pendant laquelle l'écoulement est stoppé dans la conduite de distribution ne doit pas non plus se prolonger au-delà de la période nécessaire à la formation de cristaux de glace dendritique dans la conduite. Lors des essais en laboratoire, on a prolongé ces périodes au maximum parce que le réservoir n'était pas pressurisé et que la vidange ne pouvait donc se faire que par écoulement par gravité.

4.5 Réservoir sous pression

Enfin, le réservoir sous pression, tout en ayant bien fonctionné en laboratoire, poserait un certain nombre de problèmes s'il était installé sur le terrain, comme l'illustre la figure 9 (c'est-à-dire l'évacuation de l'eau dans la conduite d'alimentation en passant par la conduite de distribution).

La taille considérable du réservoir qu'il faudrait installer constitue notamment un problème majeur. Pour un débit d'évacuation de 1,5 litre/minute et une durée de fonctionnement d'environ 14 heures (par exemple de 6 h du soir à 8 h du matin), il faudrait une possibilité de prélèvement de 1270 litres du réservoir. Le réservoir lui-même devrait avoir presque le double de cette taille, puisque l'évacuation de l'eau se poursuivrait seulement jusqu'à l'équilibre des pressions à l'intérieur du réservoir et dans la conduite d'alimentation. À l'heure actuelle, les réservoirs les plus gros qu'on trouve dans le commerce n'ont qu'une capacité de 545 litres. Un réservoir de cette capacité (selon le rapport accumulation/vidange) dont s'écoule 1,5 litre/minute serait probablement suffisant si la période de vidange durait quatre ou cinq heures. Il est à noter que les réservoirs d'une capacité plus grande que 545 litres doivent être fabriqués sur commande (Westburne, 1981; Bartle et Gibson, 1981).

L'installation sur le terrain telle qu'elle a été conçue à l'origine poserait un autre problème, celui du mécanisme de contrôle utilisé. Si on place un pressostat à l'intérieur du réservoir, il faut veiller à ce que l'écoulement de l'eau dans le réservoir soit réglé avec soin pour que le dispositif puisse fonctionner pendant les périodes nécessaires. En effet, si la pression dans le réservoir s'accroît prématurément jusqu'au niveau d'évacuation, il peut s'ensuivre une stagnation de l'eau à un moment critique au cours de la nuit, à moins qu'on ne pare à cette éventualité en installant un réservoir de plus grande capacité. L'installation du pressostat sur la conduite de distribution, ne résoud pas non plus le problème, puisqu'on ne peut pas se fier complètement au cycle de pression diurne à l'intérieur du réseau d'alimentation. Une chute de pression dans la conduite, par exemple lors d'un incendie, peut en effet provoquer la vidange prématurée du réservoir et entraîner ultérieurement une stagnation de l'eau à un moment critique.

L'utilisation d'un pressostat comme mécanisme de contrôle ne semble donc pas très réalisable; en effet, pour que ce dispositif fonctionne efficacement, il faut que le cycle de pression diurne soit constant. On pourrait contourner la difficulté en utilisant une minuterie comme mécanisme de contrôle, mais on n'en serait pas moins obligé de régler soigneusement le rythme de l'écoulement dans le réservoir. Il pourrait en effet se produire des périodes de stagnation dans la conduite de distribution pendant la période de remplissage du réservoir, si celui-ci était déjà plein et qu'il n'y avait aucune demande d'eau dans le bâtiment. Il faudrait alors installer un réservoir de plus grande capacité et augmenter le rythme d'évacuation du réservoir. On devrait aussi prévoir des dispositifs de secours pour protéger les conduites contre le gel en cas de panne de courant.

L'exploitation sur le terrain du dispositif éprouvé en laboratoire constituerait sans doute une solution plus réalisable. Au lieu de tenter de faire fonctionner le dispositif comme un réseau de recirculation à cycle diurne, on pourrait utiliser le réservoir sous pression comme un dispositif d'écoulement intermittent. Cette solution permettrait de résoudre le problème de la lenteur d'évacuation que posait le bassin utilisé lors des essais. Il faudrait cependant installer un dispositif quelconque de réglage du débit en raison du taux net élevé d'écoulement continu (64 litres pendant un cycle comportant des périodes de remplissage et d'évacuation de 13 et 2 minutes respectivement).

4.6 Coût des divers dispositifs d'écoulement continu dans les conduites de distribution

On trouvera aux tableaux 8 et 9 une analyse économique sommaire des dispositifs éprouvés avec succès en laboratoire. Tous les coûts ont été calculés en fonction de la valeur actuelle des dispositifs; la comparaison porte sur une période de 20 ans et tient compte d'un taux de rendement de 10 p. 100. Pour les besoins de la comparaison (toutes considérations d'ordre technique mises à part), l'analyse du réservoir sous pression a porté sur ses deux modes de fonctionnement possibles; soit comme dispositif d'écoulement intermittent, soit comme bassin évacuant l'eau dans la conduite d'alimentation. On a présumé qu'il serait possible de fixer à 1,5 litre/minute le débit d'évacuation du réservoir utilisé comme dispositif d'écoulement continu.

Nous nous sommes basés sur les coûts réels de l'équipement pour évaluer les dépenses d'investissement. Ainsi, le coût réel des composantes qui ont servi à fabriquer la minuterie réglable était de 140 $; le personnel technique qui l'a mise au point s'est toutefois dit d'avis que des dispositifs comparables pourraient être fabriqués pour la moitié ou les deux tiers de ce prix. Le coût du réservoir sous pression de 1360 litres a dû être évalué approximativement, puisqu'on ne trouve aucun réservoir de cette capacité dans le commerce. Le chiffre de 500 $ dont nous nous sommes servis pour nos calculs est peut-être trop bas, compte tenu du prix net d'un réservoir de 545 litres (220 $ -Westburne, 1981).

Enfin, pour calculer la consommation d'énergie de chaque dispositif, nous nous sommes basés sur les cotes de consommation de l'équipement ou sur la mesure réelle du courant utilisé. On trouvera dans les tableaux une description des autres hypothèses qui ont été émises.

Pour les besoins de la présente étude, nous avons comparé les dispositifs entre eux en nous basant sur le seuil de rentabilité des coûts de distribution et d'évacuation de l'eau, qui doivent être assumés par les consommateurs. Dans une ville comme Whitehorse, ces coûts ne correspondent pas nécessairement à la facture que reçoit le consommateur pour l'eau qu'il consomme, mais plutôt à ce qu'il devra payer, par le biais de taxes municipales plus élevées ou d'une augmentation du coût d'autres services municipaux, pour faire fonctionner le réseau.

Cette méthode d'analyse permet d'éviter les difficultés que comporte l'évaluation de certains coûts indirects inhérents au réseau de distribution de l'eau et de collecte des eaux d'égout. Nous n'en croyons pas moins que nos chiffres constituent une évaluation valable des coûts respectifs de chacun des dispositifs étudiés.

Si on examine les comparaisons que nous avons faites, on se rend compte qu'en raison des dépenses d'investissement plus élevées qu'elle exige, la solution du réservoir sous pression fonctionnant en écoulement continu n'est pas économique par rapport à la minuterie ou au diaphragme. Les problèmes techniques mis à part, le réservoir sous pression fonctionnant sans écoulement continu est plus économique que la minuterie et le diaphragme si les coûts de distribution et d'évacuation de l'eau sont de 5,08 $ et 8,35 $ par mètre cube respectivement. La minuterie devient quant à elle une solution valable économiquement par rapport au diaphragme si le coût de distribution et d'évacuation de l'eau est de 1,73 $/m^3. Pour les besoins de la comparaison, disons que la ville d'Edmonton, dont le taux de consommation par habitant est à peu près le même (68 100 litres par mois), a fixé le prix de l'eau pour ses abonnés résidentiels à 7,26 $/m^3 pour l'année 1981 (ville d'Edmonton, 1981).

Le taux de rendement aura des répercussions considérables sur ces calculs. Des taux d'intérêt peu élevés favoriseront l'utilisation de dispositifs comportant des investissements importants et des coûts annuels faibles, tandis que des taux d'intérêt élevés favoriseront les combinaisons inverses.

Tableau 8 **Coût estimatif des divers dispositifs d'écoulement continu dans les conduites de distribution**

Dispositif	Composantes	Coût initial (capital et installation) ($)	Écoulement continu (litres/année)	Énergie utilisée (kWh/année)
Diaphragme	Diaphragme et raccord	5,00	262 080	0
	Détendeur de pression	50,00		
	Installation	20,00		
	Total	75,00		
Minuterie	Minuterie	00,00	201 131	54,5
	Soupape à solénoïde	50,00		
	Installation	20,00		
	Total	170,00		
Réservoir sous pression	Réservoir	150,00	262 080	132,8
	Soupape à solénoïde	150,00		
	Pressostat et minuterie	100,00		
	Installation	50,00		
	Total	450,00		
Réservoir sous pression	Réservoir	500,00	0	132,8
	Soupape à solénoïde	150,00		
	Pressostat et minuterie	100,00		
	Installation	50,00		
	Total	800,00		

Hypothèses:

1) Tarif horaire de 20$ pour l'installation.
2) Pour l'écoulement continu, 182 jours à 1,5 litre/minute.
3) Pour l'écoulement intermittent (minuterie), un cycle comportant des périodes d'écoulement et de non-écoulement de 2,2 et 2,1 minutes respectivement. Ces chiffres sont basés sur:
   a) le calcul à valeur constante de la chute de température dans une conduite de distribution non isolée de 23 m de longueur et de 16 mm de diamètre intérieur, enterrée à 1,8 m, dont la température extérieure descend à -1 °C et dont le débit est de 1,5 litre/minute;
   b) le calcul à valeur constante du temps qu'il faut à l'eau qui stagne dans une conduite et dont la température initiale est de 3 °C pour atteindre la température calculée en a;
   c) le temps qu'il faut à l'eau pour s'écouler à un rythme de 1,5 litre/minute dans une conduite de 16 mm de diamètre extérieur et de 23 m de longueur;
   d) un coefficient de sécurité de 15 p. 100, qu'on ajoute à la période d'écoulement continu requise, calculée précédemment.

Tableau 9 **Comparaison économique divers dispositifs d'écoulement continu dans les conduites de distribution**

Dispositifs comparés	Seuil de rentabilité: coût de distribution et d'évacuation de l'eau ($/m^3)	Conclusion
Minuterie et diaphragme	1,73	À 1,73 $/m^3 ou plus, la minuterie sera plus économique que le diaphragme
Minuterie et réservoir sous pression (avec écoulement continu)	s.o.	Le réservoir sous pression fonctionnant en écoulement continu n'est pas économique par rapport à la minuterie
Minuterie et réservoir sous pression (sans écoulement continu)	8,35	À 8,35 $/m^3 ou plus, le réservoir sous pression fonctionnant sans écoulement continu est plus économique que la minuterie
Diaphragme et réservoir sous pression (sans écoulement continu)	s.o.	Le réservoir sous pression fonctionnant en écoulement continu n'est pas économique par rapport au diaphragme
Diaphragme et réservoir sous pression (sans écoulement continu)	5,08	À 5,08 $/m^3 ou plus, le réservoir sous pression fonctionnant sans écoulement continu est plus économique que le diaphragme

Hypothèses:
1) Coût du dispositif = coût initial (capital + installation) + valeur actuelle des coûts annuels (énergie + écoulement continu de l'eau)
2) Coût de l'énergie = 0,10 $/kWh
3) Taux de rendement de 10 p. 100 sur 20 ans

$$\text{Facteur de valeur actuelle} = \frac{(1+i)^n - 1}{i\,(1+i)^n} = 8{,}5136$$

5 RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

L'écoulement continu dans les conduites de distribution, les culs-de-sac et les prises d'eau est la façon la plus simple de protéger contre le gel les réseaux classiques d'adduction d'eau dans les régions nordiques. Les dispositifs d'écoulement continu comportent cependant un aspect négatif, soit l'augmentation du volume d'eau consommée, des coûts d'exploitation et du volume des eaux usées froides et diluées.

La présente étude avait pour objet la mise au point de dispositifs de contrôle de l'écoulement continu dans les conduites de distribution, qu'il serait possible de combiner aux dispositifs actuels d'écoulement continu. À cette fin, nous avons étudié la mise au point et les caractéristiques des dispositifs d'écoulement continu existants, en mettant tout particulièrement l'accent sur celui de la ville de Whitehorse au Yukon.

Cinq dispositifs ont été éprouvés en laboratoire: un dispositif de réglage de la température, une minuterie, un réservoir de vidange à écoulement par gravité, un diaphragme et un réservoir sous pression. Les résultats des essais suggèrent les conclusions qui suivent.

En théorie, c'est le dispositif de réglage de la température qui promettait le meilleur contrôle de l'écoulement continu parce que son fonctionnement reposait sur l'indicateur le plus direct du manque de chaleur dans une conduite. Malheureusement, en raison du manque de sensibilité de la sonde thermométrique, problème relié principalement à la difficulté de placer la sonde à l'endroit le plus approprié sur une conduite de distribution existante, ce dispositif de contrôle de l'écoulement continu n'est pas applicable.

Le réservoir sous pression, qui renvoie l'eau dans la conduite d'alimentation lors des périodes de basse pression du réseau, ne peut pas non plus être considéré comme une solution valable. Outre la taille considérable du réservoir qu'il faudrait installer, le dispositif dépend trop fortement d'un cycle de pression diurne constant dans le réseau de distribution.

Pour une raison différente, le bassin ordinaire, qui se remplit d'eau et se vidange dans un drain d'égout, ne peut pas être considéré comme une solution de rechange valable. Cela tient surtout au fait que l'écoulement par gravité est une méthode trop lente d'évacuation de l'eau accumulée. Même en réduisant le volume d'eau accumulée, on ne réglerait pas le problème; en effet, la période de remplissage serait elle aussi réduite, ce qui accroîtrait les risques de gel dans la conduite d'alimentation. L'utilisation d'un réservoir sous pression permettrait de résoudre le problème. On n'en serait pas moins obligé de régler soigneusement les débits de remplissage et d'évacuation du réservoir et d'installer un mécanisme de contrôle fiable. Cette version du bassin n'étant pas considérée comme réalisable, elle n'a donc pas été retenue.

Deux des dispositifs éprouvés sont cependant considérés comme techniquement valables et mériteraient d'être étudiés de façon plus approfondie; il s'agit du diaphragme et de la minuterie réglable. Utilisé seul, le diaphragme permet de régler le débit d'écoulement continu à un minimum préétabli et dégage l'opérateur de cette responsabilité. On peut éviter les problèmes dus à la présence de sable et économiser un plus grand volume d'eau en combinant le diaphragme à un détendeur de pression.

C'est la minuterie réglable qui permet les plus grandes économies d'eau, puisque l'écoulement n'est qu'intermittent. Si on se fonde par exemple sur la consommation dans la ville de Whitehorse, le volume total d'eau écoulée n'équivaudrait, avec la minuterie réglable, qu'à la moitié du volume d'eau que laisserait écouler le diaphragme.

Si on compare les deux dispositifs en fonction de leur valeur actuelle et d'une durée de vie de 20 ans, c'est la minuterie qui semble être le plus économique en raison surtout de la réduction de la consommation d'eau qu'elle permet.

La mise au point plus poussée de l'une ou l'autre de ces solutions ou des deux nécessiterait la mise sur pied d'un programme d'essais sur le terrain, qui permettrait de vérifier le rendement des dispositifs dans les conditions de fonctionnement réelles. On pourrait, à partir des résultats obtenus, prendre les décisions techniques et économiques qui s'imposent en ce qui concerne leur installation en vue d'un usage général.

RÉFÉRENCES

Alter, A.J. (1950). Arctic Sanitary Engineering. Federal Housing Administration, Washington, D.C., 106 pp.

Alter, A.J. (1963). Sanitary Engineering in Alaska. Travaux du Congrès international sur le pergélisol, 11 au 15 novembre 1963, Purdue University, Lafayette, Indiana, National Academy of Science - National Research Council, Washington, (D.C.) 407-409.

Alter, A.J. (1974). An Evaluation of Waste Disposal Practices in Alaskan Villages. Travaux du symp. sur le traitement des eaux usées en climat froid, 22 au 24 août 1973, Université de Saskatchewan, Saskatoon, réd. E. Davis, rapport du Service de la protection de l'environnement EPS 3-WP-74-3, Environnement Canada, Ottawa (Ont.) 1-28.

Alter, A.J. (1977). Utilities Delivery in Arctic Regions - Early Developments in Alaska. Symp. on Utilities Delivery in Arctic Regions, 16-18 March, 1976, Edmonton (Alb.) réd. D.W. Smith, rapport du Service de la protection de l'environnement EPS 3-WP-74-3, Environnement Canada, Ottawa (Ont.) 18 - 69.

Alter, A.J. (1979). Support Systems State on the Art Review. Travaux du Congrès sur les techniques appliquées en climat froid, Congrès sur les régions froides, Anchorage (Alaska), 17 au 19 mai 1978, American Society of Civil Engineers, New York (NY) 742-774.

Anderson, T.K. (1959). Maintaining Water Supply Lines at Zero Temperatures. Water and Sewage Works J., 106, 5, 212.

Armstrong, B.C. et P.W. Given (1979). Preliminary Analysis of Alternatives for Upgrading Service Line Water Bleeders (ébauche). Sous-section de la technologie nordique. Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, Edmonton (Alb.)

ASHRAE Handbook of Fundamentals (1972). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., New York (NY) 668 p.

Associated Engineering Services Limited (1963a). Preliminary Report to the Government of the Yukon Territory on Water and Sewer Services Porter Creek Subdivision, Whitehorse (T.Y.), Edmonton (Alb.), 20 pages.

Associated Engineering Services Limited (1963b). Report to Commissioner Government of the Yukon Territory on Feasibility of a Joint Water Supply Camp Takhini - Porter Creek, Edmonton (Alb.), 22 pages.

Associated Engineering Services Limited (1967). Report to City of Whitehorse on Water and Sewer Facilities 1967, Edmonton (Alb.), 35 pages.

Associated Engineering Services Limited (1969). Report to Department of Engineering and Municipal Affairs Government of the Yukon Territory on Water Supply for Porter Creek, Edmonton (Alb.), 40 pages.

Associated Engineering Services Limited (1979). City of Whitehorse Yukon Territory Waterworks, Sewage & Roadways Engineering Analysis and Capital Works Budget 1979 - 1984, Edmonton (Alb.), 82 pages.

Balmer, P. (1980). Expérience suédoise dans le traitement des eaux usées particulièrement en climat froid. Travaux du séminaire de l'Association int. pour la recherche en pollution des eaux, PS4 Design of Water and Wastewater Services for Cold Climate Communities, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, 28 et 29 juin 1980.

Bartle & Gibson Co. Ltd. (1981). Vendeurs en gros de matériel de plomberie, réservoirs sous pression. Edmonton (Alb.), communication privée.

Cameron, J.J. et B.C. Armstrong (1979). Water and Energy Conservation Alternatives for the North. Water and Sanitation Section, Department of Local Government, Government of the Northwest Territories/Sous-section de la technologie nordique, Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, Edmonton (Alb.), 74 pages.

Chong, T.M.Y. et T.T. Mattes (1980a). A Water Supply for the World's Most Northerly Permanent Community, The Canadian Military Engineer, 12, 1, 14 - 20.

Chong, T.M.Y. et T.T. Mattes (1980b). A Water Supply for the World's Most Northerly Permanent Community, travaux du 2e symp. sur l'aménagement des services publics dans les régions nordiques, 19 au 21 mars 1979, Edmonton (Alb.), réd. D.W. Smith, Service de la protection de l'environnement, rapport ESP 3-WP-80-5F, Environnement Canada, Ottawa (Ont.)

City of Edmonton (1981). Water and Sanitation Department Municipal Water Rates. Edmonton (Alb.), communication privée.

City of Whitehorse (1975). Engineering Design Standards for the City of Whitehorse, Engineering Department, City of Whitehorse, Whitehorse (T.Y.).

Clark, J.W., W. Weissman Jr. et H.J. Hammer (1971). Water Supply and Pollution Control, 2nd ed., International Textbook Company, Scranton (Pennsylvanie), 660 pages.

Constance, J.D. (1964). Calculated Bleed Required to Protect Pipe from Freezing. Chemical Engineering, 71, 3 août 1964, 120 - 122.

Coop, S.S. (1954), Two Water Supply Systems of Northwestern Canada. Travaux du 3e Congrès scient. de l'Alaska, Mt. McKinley National Park, 22 au 27 septembre 1952, Alaska Division, American Assoc. for the Advancement of Science, College (Alaska), 62 - 63.

Cormie, J. (1979). Communication privée. Department of Highways and Public Works, Government of the Yukon, Whitehorse.

Dawson, R.N. et K.J. Cronin (1977). Évolution de la politique et des programmes concernant l'eau et l'hygiène dans les Territoires du Nord-Ouest. L'aménagement des services publics dans les régions nordiques. Edmonton (Alb.), réd. D.W. Smith, Service de la protection de l'environnement. Rapport EPS 3-WP-80-5F. Environnement Canada, Ottawa (Ont.), p. 4 - 10.

Dickens, H.B. (1959). Water Supply and Sewage Disposal in Permafrost Areas of Northern Canada. The Polar Record, 9, 62, 421 - 432.

Fair, F.M., J.C. Geyer et D.A. Okun (1966). Water and Wastewater Engineering Vol. 1, Water Supply and Wastewater Removal. John Wiley & Sons, Inc., New York (NY).

Foster, A. (1980). Technologist, Engineering Department, City of Whitehorse, Whitehorse, Y.T. Pumping Costs. Communication privée.

Given, P.W. et D.W. Smith (1979). RBC Treatment of Cold Dilute Wastewater, Proc. of the Conf. on Applied Techniques for Cold Environments, Cold Regions Specialty Conf., Anchorage, Ak., 17-19 May, 1978, American Society of Civil Engineers, New York (NY) 490 - 500.

Grainge, J.W. (1958). Water and Sewer Facilities in Permafrost Regions. The Municipal Utilities Magazine, 96, 10, 29, 62 - 67.

Grainge, J.W. (1959). Water Supplies in the Central and Western Canadian North. J. American Water Works Assoc., 51, 1, 55 - 66.

Grainge, J.W. (1968). Solutions to Northern Insanitary Conditions, Manuscript Report No. NR-68-6, Division of Public Health Engineering, Department of National Health and Welfare, Edmonton (Alb.), 57 pages.

Grainge, J.W. (1969a). Arctic Heated Pipe Water and Wastewater Systems. Water Research, Permagon Press, Oxford, England, 3, 47 - 71.

Grainge, J.W. (1969b). Environmental Engineering in Northern Areas of the Western World, Manuscript Report No. NR-69-4, Congrès de l'institut canadien sur le contrôle de la pollution, 27 au 29 oct. 1969, Montréal (Qué.), 14 pages.

Hammer, M.J. (1977). Water and Wastewater Technology, SI Version. John Wiley and Sons, Toronto.

Hanson, R.G. (1975). Unit Water Use in Alaskan Municipal Water Supplies. Environmental Standards for Northern Regions, symp. 13-14 juin 1974. Anchorage, Ak., réd. D.W. Smith et T. Tilsworth, Institute of Water Resources Report No. IWR No. 62, University of Alaska, Fairbanks, 321 - 329.

James, F.W. (1980a). Distribution & Collection Systems in North America. Travaux de International Assoc. on Water Pollution Research Post Conf. Seminar -PS4 Design of Water and Wastewater Services for Cold Climate Communities, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, 28 juin 1980.

James, F.W. (1980b). Évaluation critique des réseaux de canalisations souterraines, isolées et peu profondes, dans les Territoires du Nord-Ouest. L'aménagement des services publics dans les régions nordiques, Edmonton (Alb.) réd. D.W. Smith. Service de la protection de l'environnement. Rapport nº EPS 3-WP-80-5F. Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 104 - 135.

Lotz, J.R. (1961). A General Introduction to Whitehorse, Yukon Territory, Area and Community Planning Section, Industrial Division, ministère des Affaires du Nord et des Ressources nationales, Ottawa (Ont.), 27 pages.

Martin, B. (1979). The Water Wastage Problem in Alaska. Proc. of the Conf. on Applied Techniques for Cold Environments, Cold Regions Specialty Conf. Anchorage, Ak., 17 au 19 mai 1978. American Society of Civil Engineers, New York (NY), 1085 - 1092.

Murphy, R.S. et C.W. Hartman (1969). A Water Distribution System for Cold Regions, The Single Main Recirculation Method an Historical Review, Field Evaluation and Suggested Design Procedures, Report No. IWR-8, Institute of Water Resources, University of Alaska, Fairbanks, 72 pages.

T.H. Newton Engineering Ltd. (1964). Report Whitehorse Water Supply, Edmonton (Alb.), 103 pages.

Page, W.B. (1954a). Design of Water Distribution Systems for Arctic Regions. Proc. Third Alaskan Science Conf., Mt. McKinley National Park, 22 au 27 septembre 1952, Alaska Division, American Assoc. for the Advancement of Science, College, Ak., 56 - 61.

Powergain Manufacturing Ltd. (1982). Resisto-freeze. P.O. Box 3031, Langley (C.B.) V3A 4R3.

Prentice, J.R. et G.A. Srouji (1980). Le système de captage des eaux à Yellowknife. L'aménagement des services publics dans les régions nordiques, Actes du symp. tenu les 19, 20 et 21 mars 1979 à Edmonton (Alb.) Service de la protection de l'environnement. Rapport EPS 3-WP-80-5F. Ottawa (Ont.), 280 - 290.

Raniga, S. (1980). Greywater Characterization & Treatment for Isolated Northern Communities, M. Sc. thesis, Environmental Sciences, University of Alberta, Edmonton, 233 pages.

Reid, Crowther & Partners Limited (1970). General Development Plan Whitehorse Metropolitan Area 1970, Winnipeg (Man.), 55 pages.

Reid, Crowther & Partners Limited (1977). Town of Pine Point, Computer Analysis of Water Distribution System. Préparé pour la ville de Pine Point, Territoires du Nord-Ouest.

Rosendahl, G. (1980). Programme, conception et construction des services publics au Groenland. L'aménagement des services publics dans les régions nordiques, Actes du symp. tenu les 19, 20 et 21 mars 1979. Réd. D.W. Smith, Service de la protection de l'environnement, Rapport EPS 3-WP-80-5F. Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 10 - 17.

Shillington, E.I., W.H. Keifer et N.J. Nutall (1981). Dawson City Water and Sewerage Program - An Overview. Proc. of the Specialty Conf. on the Northern Community: A Search for a Quality Environment, Seattle, Washington, 8 au 10 avril 1981, réd. T.E. Vinson, American Society of Civil Engineers, New York (NY), 288 -299.

Shillington, E.I. (1981). Conseiller en ingénierie du réseau d'adduction d'eau de Dawson City, communication privée.

Smith, D.W., S. Reed, J.J. Cameron, G.W. Heinke, F. James, B. Reid, W.L. Ryan et J.W. Scribner (1979). Manuel d'aménagement des réseaux de services publics en climat froid, Service de la protection de l'environnement. Rapport EPS 3-WP-79-2F. Environnement Canada, Ottawa (Ont.)

Smith, D.W. et D.W. Given (1979). Ozonation of Dilute, Low-Temperature Wastewater. Proc. of the Conf. on Applied Techniques for Cold Environments, Cold Regions Specialty Conf. Anchorage, Ak., 17 - 19 May, 1978, American Society of Civil Engineers, New York (NY), 548 - 559.

Smith, D.W. et P.W. Given (1980). Dilute Wastewater, Proc. International Assoc. on Water Pollution Research Post Conf. Seminar - PS4 Design of Water and Wastewater Services for Cold Climate Communities, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, 28 - 29 juin 1980.

Stanley Associates Engineering Ltd. (1974). Final Report on Community Services Improvements Program Yukon Territory, Edmonton (Alb.)

Stanley Associates Engineering Ltd. (1977). Dawson City, Yukon Utilities Pre-Design Report, Edmonton (Alb.)

Stanley, D.R. (1965). Water and Sewerage Problems in Discontinuous Permafrost Regions. Proc. of the Canadian Regional Permafrost Conf., 1er et 2 décembre 1964, Technical Memorandum No. 86, ed. R.J.E. Brown, Associate Committee on Soil and Snow Mechanics, Conseil de recherches du Canada, Ottawa (Ont.), 93 - 105.

Stephenson, D.G. (1977). Preventing Exposed Water Pipes from Freezing. Building Research Note No. 120, Conseil de recherches du Canada, Ottawa (Ont.), 7 pages.

Thornton, D.G. (1977). Calculation of Heat Loss from Pipes. Proc. Symp. on Utilities Delivery in Arctic Regions, 16 - 18 March, Edmonton (Alb.), red. D.W. Smith, Environmental Protection Service Report No. EPS 3-WP-77-1, Ottawa (Ont.), 131 - 150.

Westburne Wholesale Distributers. (1981). Vendeur de matériel de plomberie. Réservoirs sous pression. Edmonton (Alb.), communication privée.

Whyman, A.D. (1979). Shallow-Buried Pre-Insulated Piping A Proven Utilities System, Technical brochure, Dupont Canada, Inc., Mississauga (Ont.), 42 pages.

Whyman, A.D. (1980). Canalisations pré-isolées en polyéthylène à densité élevée: évolution d'un projet dans le Nord. L'aménagement des services publics dans les régions nordiques, Actes du symp. tenu les 19, 20 et 21 mars 1979 à Edmonton. Service de la protection de l'environnement. Rapport EPS 3-WP-80-5F. Environnement Canada, Ottawa (Ont.), 135 - 159.

Yates, A.B. et D.R. Stanley (1963). Domestic Water Supply and Sewage Disposal in the Canadian North. Proc. Permafrost International Conf., 11 au 15 novembre 1963. Purdue University, Lafayette, Indianna, National Academy of Science - National Research Council, Washington (D.C.), 413 - 419.

Zarling, J.P. (1979). Growth Rates of Ice. Proc. of the Conf. on Applied Techniques for Cold Environments, Cold Regions Specialty Conf., Anchorage, Ak., 17 au 19 mai 1978. American Society of Civil Engineers, New York (NY), 100 - 111.

ANNEXE - ÉQUATION DE L'ORIFICE*

On peut réduire le débit du liquide s'écoulant dans une section droite d'une conduite sans perturbation en y plaçant une plaque munie d'un orifice assez petit. On peut déterminer le taux d'écoulement qui s'ensuit en utilisant la forme suivante de l'équation de l'orifice:

$$Q = C\,A\left[\frac{2gH}{1-\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}\right]^{1/2}$$

où Q = l'écoulement en litres/minute (pi^3/s)
C = le coefficient de l'orifice (sans dimensions)
A = la zone de l'orifice en m^2 (pi^2)
g = l'accélération due à la gravité
= 9,81 m/s^2 (32,2 pi/s^2)
H = la différence de pression entre les deux côtés de l'orifice en mètres (pieds) d'eau (1 m d'eau ≈ 9,81 kPa)
d_2 = le diamètre de l'orifice en mètres (pieds)
d_1 = le diamètre intérieur du tuyau en mètres (pieds)

On peut régler le volume d'écoulement du tuyau en contrôlant la différence de pression, le diamètre de l'orifice ou le diamètre du tuyau. La grandeur du coefficient de l'orifice dépend de la configuration de l'orifice. Dans un écoulement libre, H équivaut simplement à la pression de la conduite en amont de l'orifice.

Pour obtenir un taux d'écoulement libre à l'intérieur d'un tuyau, on doit attribuer des valeurs de vérification à d_2 et à H. On trouvera au tableau A les taux d'écoulement pour différents diamètres d'orifice et différentes pressions dans la conduite. Les chiffres contenus dans ce tableau se fondent sur les hypothèses suivantes:

1) un tuyau de 15,6 mm (5/8 po) de diamètre extérieur et de 12,7 mm (1/2 po) de diamètre intérieur
2) un orifice percé en mince paroi, dont la valeur C a été fixée à 0,61
3) de l'eau à 4,4 °C (40 °F) et d'une densité massique de 1,0 g/cm^3 (62,42 lb/pi^3)

---

* Ouvrages de référence:

Associated Water and Air Resources Engineers Inc. (1973), Handbook for Monitoring Industrial Wastewater, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Technology Transfer, Washington (D.C.).

Cusick, C.F. (éd.), Flow Meter Engineering Handbook, 5e édition, Honeywell Process Control Div., Fort Washington (Penn.)

Vennard, J.K. et R.L. Street (1975), Elementary Fluid Mechanics, 5e édition, John Wiley and Sons Inc., New York (NY).

TABLEAU A

Taux d'écoulement libre, en l/mn (gal imp./mn)*

d_2, mm (po) \ H, kPa (lb/po^2)	275 (40)	310 (45)	345 (50)	379 (55)	414 (60)
3,21 (1/8)	6,82 (1,5)	7,26 (1,60)	7,63 (1,68)	8,00 (1,76)	8,36 (1,84)
2,39 (3/32)	3,82 (0,84)	4,18 (0,90)	4,27 (0,94)	4,50 (0,99)	4,68 (1,03)
1,60 (1/16)	1,72 (0,38)	1,82 (0,40)	1,91 (0,42)	2,00 (0,44)	2,09 (0,46)
1,19 (3/64)	0,96 (0,21)	1,00 (0,22)	1,09 (0,24)	1,14 (0,25)	1,18 (0,26)
0,79 (1/32)	0,42 (0,09)	0,45 (0,10)	0,45 (0,10)	0,50 (0,11)	0,50 (0,11)

* Les valeurs numériques, les constantes et les calculs figurant dans la présente annexe ont tous été convertis sans précision exagérée en unités métriques, à partir des équivalents originaux en unités du système anglais.

Un diaphragme dont l'orifice percé en mince paroi a 1,52 mm de diamètre et qui est installé dans une conduite de 12,7 mm de diamètre intérieur, dans laquelle la pression est de 275 kPa (28,1 m), produit un écoulement libre égal à 1,57 litre/minute.

$$\text{donc } Q = (0{,}61)\ \frac{\pi \left(\frac{1{,}52}{1000}\right)^2}{4}\ \left[\frac{2(9{,}81)\ (28{,}1)}{1 - \left(\frac{1{,}52}{1000} \Big/ \frac{12{,}7}{1000}\right)^4}\right]^{1/2} (60\ \text{s/mn})\ (1000\ \text{l/m}^3)$$

$$= 1{,}57\ \text{l/mn}$$